

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Master académique

En ELECTROTECHNIQUE

Spécialité: Machines électriques

Présenté par

ABBA FAIZA

ALIOUANE SAMIA

Licence Académique, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou

Thème

**Modélisation électromagnétique par éléments finis 2D d'un
générateur linéaire tubulaire utilisé pour la récupération de
l'énergie des vagues**

Mémoire soutenu publiquement le **03juillet2013** devant le jury d'examen composé de :

Président	Chafik BIROUCHE	Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou
Rapporteur	M'hemed RACHEK	Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou
Examineur	Mustapha BOUHERAOUA	Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou
Examineur	Mustapha ZAOUIA	Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou

Remerciements

Nous remercions en premier lieu Dieu le tout puissant pour nous avoir donné la force et la volonté d'accomplir ce travail.

On tient à remercier très vivement Monsieur **Mohamed RACHEK** maître de conférences A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour la confiance qu'il nous a accordé en nous proposant ce thème. Que toute notre gratitude lui soit exprimée pour avoir accepté de nous encadrer et encouragé tout au long de ces travaux de mémoire ainsi que pour toute la documentation qu'il a mise à notre disposition. A sa grande expérience scientifique et à ses qualités humaines s'ajoute une capacité de prospection magique. Par sa disponibilité lors de nos différentes sollicitations et par ses conseils, il nous a constamment guidés et formés. Nous lui serions toujours redevables.

Nous adressons nos plus vifs remerciements à Monsieur **Chafik BIROUCHE** maître assistant A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant de présider le jury.

Nos remerciements vont également à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de participer au jury, en l'occurrence :

Monsieur **Mustapha BOUHERAOUA** maître de conférences A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Monsieur **Mustapha ZAOUIA** maître de conférences B à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

On exprime notre profonde reconnaissance à nos parents pour leurs encouragements qui nous ont permis de finaliser ce travail.

On remercie tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, pour la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

A la mémoire de mon cher grand père

Mes très chers parents qui m'ont toujours encouragé et soutenu

Surtout à ma mère la lumière de ma vie

Mes deux sœurs et mes deux frères

A l'être le plus cher pour moi

Mes amis(es)

Samia ALIOUANE

Je dédie ce mémoire à :

A mes très chère Parent

A mon frère AHCENE

A mes oncles et mes tentes

A mes cousins

Et à tous amis(es).

Faiza ABBA

Résumé

Ce présent mémoire présente, l'analyse du comportement électromagnétique des machines électriques linéaires tubulaires utilisées pour l'exploitation de l'énergie des vagues pour la production de l'électricité. A cet effet, la modélisation électromagnétique d'une machine électrique linéaire tubulaire est faite sur la base des équations de Maxwell, et des relations de milieux. Le modèle magnétostatique et magnétodynamique obtenu est exprimé en terme de potentiel vecteur magnétique en coordonnées cylindrique, intégrant l'aimantation due aux aimants permanents. La simulation du mouvement est opérée en utilisant la technique de la bande géométrique. Ainsi à chaque pas de déplacement de la partie en mouvement, les grandeurs induction magnétique, force magnétique axiales et radiales calculée par la formule de Lorentz, flux et inductances obtenues à partir de l'énergie magnétique, sont évaluées. Les codes de calcul sont basés sur la méthode des éléments finis implémentés sous environnement Matlab. Ainsi les performances magnétiques de la machines linéaires est évalué à travers un ensemble de simulations : alimentation de bobines seule, aimants seules, aimants et bobines combinés. Les forces électromotrices induites disponibles sur les enroulements calculées sont obtenues pour différentes vitesse de déplacement, et ça pour avoir le mode générateurs.

Mot clés : Energie des vagues, machines linéaires, génératrice linéaire, méthode des éléments finis, modélisation électromagnétique.

Introduction général..... 1

Chapitre I : Généralités sur les différentes énergies renouvelables

I.1 Introduction3

I.2 Les ressources énergétiques renouvelables.....3

I.2.1 L'énergie d'origine solaire4

I.2.2 L'énergie hydraulique6

I.2.3 L'énergie éolienne6

I.2.4 La géothermie7

I.2.5 La biomasse8

I.2.6 Les interactions gravitationnelles Terre-Lune-Soleil8

I.2.7 L'énergie de la houle9

I.2.8 Possibilités d'exploitation des différentes énergies renouvelables9

I.3 Les énergies des mers10

I.4. Eolienne offshore10

I.5. L'énergie des courants marins (hydro cinétique ou hydrolienne)11

I.6. L'énergie thermique des mers (ETM)12

I.7 L'énergie des vagues (houlomotrice)13

I.7.1 Caractéristiques énergétiques de la houle14

I.7.2 Principes techniques d'exploitation de l'énergie des vagues15

 a. Déferlement.....15

 b. Colonne d'eau oscillante16

 c. Flotteurs en surface :(système oscillants (rotation) flottants)16

 d. Systèmes oscillants (translation) immergés17

I.8 Les systèmes existants17

I.8.1 Le Pelamis18

I.8.2 Le Limpet19

I.8.3 Archimède Wave Swing (AWS)20

I.9 Effet sur l'environnement et sur les créatures de mer21

I.10 Conclusion22

Chapitre II : Etat de l'art sur les machines électriques linéaires

II.1 Introduction23

II.2 Caractéristiques spécifiques aux machines linéaires et domaines d'applications	24
II.3 Différents types des machines électriques linéaires	25
II.3.1 Moteur linéaire à induction	26
II.3.3 Moteur linéaire pas à pas à reluctance variable	26
II.3.4 Moteur pas à pas linéaire polarisés	27
a- Les moteurs hybrides	27
b- Machines linéaires à aimant permanent	28
II.3.5 Moteur linéaire tubulaire asynchrone triphasé	28
II.4 Différents types des générateurs linéaires	29
II.4.1 La Génératrice linéaire tubulaire	30
II.4.2 La Génératrice linéaire plan	31
II.5 Notion sur les aimants permanents	32
II.5.1 Performances magnétiques des aimants	32
II.5.2 Les différents types d'aimants permanent	34
II.6 Les avantages et les inconvénients de la machine linéaire	34
II.7 Conclusion	35

Chapitre III : Modélisation électromagnétique.

III.1 Introduction	36
III.2 Les équations de Maxwell (1831-1879)	36
III.3 Diagramme de Tonti	37
III.4 Loi de continuité (la conservation de charge)	38
III.5 Relation entre les milieux	38
III.6 Loi d'ohm	39
III.7 Condition de passage entre deux milieux de propriété différents	40
III.8 Modèle magnétodynamique quasi-stationnaire	41
III.9 Passage des champs aux potentiels	41
III.10 Condition de jauge	42
III.11 Les conditions aux limites	42
III.12 Modèle magnétodynamique en potentiel vecteur magnétique A et potentiel scalaire électrique V	43
III.12.1 Modèle AV général	43
III.12.2 Modèle en A général	44

III.13	Modèle magnétostatique	45
III.13.1	Modèle magnétostatique scalaire	45
III.13.2	Modèle magnétostatique vectorielle	45
III.14	Conclusion	46

Chapitre IV : Méthode de résolutions des modèles électromagnétiques

IV.1	Introduction	47
IV.2	Méthodes analytiques	47
IV.3	Méthodes Semi-analytiques	48
IV.3.1	Méthode des circuits couplés	48
IV.3.2	Méthode de PEEC (Partiel Electric Equivalent Circuits)	50
IV.4	Méthodes numériques	50
IV.5	Méthode des différences finies (MDF)	50
IV.6	Principe de la Méthode des Eléments Finis (MEF)	51
IV.7	Présentation de la méthode des éléments finis(MEF)	52
IV.7.1	Transformation de l'EDP à une formulation d'intégrale	52
IV.7.1.a	Formulation variationnelle de Ritz	52
IV.7.1.b	Formulation des Résidus pondérés (méthode de Galerkin)	54
IV.7.2	Discrétisation et approximation	54
IV.8	Conclusion	56

Chapitre V : Modélisation des machines électriques linéaires

V.1	Introduction	57
V.2	Modèles électromagnétique des machines linéaires	57
V.3	Formulation élément finis des modèles électromagnétiques EM	59
V.4	Calcul des grandeurs globales	64
V.4.1	Equation de l'énergie électromagnétique	64
V.4.2	Calcul de l'inductance	65
V.4.3	Méthodes de calcul des forces magnétiques	66
V.4.3.a	Méthode de la force de Lorentz	66
V.4.3.b	Méthode des tenseurs de maxwell	67
V.4.3.c	La méthode de la variation de l'énergie magnétique ou la Co-énergie	68
V.4.3.d	La méthode des travaux virtuels	69

Sommaires

V.5 Simulation du mouvement	69
V.5.1 Les techniques de remaillages	70
V.5.1.a Remaillage complet ou partiel (Bande de mouvement)	70
V.5.1.b Méthode du macro-élément	70
V.6 Les méthodes de raccordement de maillages fixe et mobile	71
V.6.1 Méthode d'interpolation nodale	71
V.6.2 Méthode de la bande géométrique : affectation des propriétés	72
V.7 Conclusion	74

Chapitre VI : Application et résultats

VI.1 Introduction	75
VI.2 Description du dispositif	75
VI.2.1 Dimension géométriques de la génératrice	75
VI.2.2 Caractéristiques physiques	76
VI.3 Domaine de résolution et conditions aux limites	77
VI.4 Maillage du domaine de résolution	78
VI.5 Modèle d'équation de modélisation	78
VI.6 Analyse de l'état magnétique de la machine	79
VI.6.1 Bobine alimentées	79
VI.6.2 Bobines non alimentées et présence d'aimantation	80
VI.6.3 Alimentation des bobines avec présence d'aimantation	81
VI.6.4 Influence de l'entrefer sur les inductions B_{θ} et B_r	82
VI.7 Calcul des inductances propre et mutuelles des bobines μ	84
VI.8 Calcul des grandeurs électromagnétiques	85
VI.9 Calcul de la force électromotrice	94
VI.10 Interprétation des résultats	96
VI.11 Conclusion	97

Conclusion générale	98
----------------------------------	-----------

Bibliographie

Introduction Générale

Introduction générale

La crise «énergétique» menaçante pousse les hommes à se pencher sur différentes sources potentielles d'énergie pour le remplacement de la source traditionnelle qu'est le pétrole. C'est ainsi que des recherches sont faites dans des différents domaines comme le solaire, l'éolien, la biomasse et autres sont les bien venues [1]. Ces pour cela qu'on s'est intéressée par l'énergie des vagues qu'est l'une des plusieurs formes de l'énergie marine, même si ce n'est pas la plus facile à exploiter, compte-tenu de la mauvaise maîtrise du comportement des vagues d'une part, et des incertitudes et fluctuations fréquentes des paramètres d'autre part, sans oublier l'agressivité du milieu marin face aux éléments de machines pour la plupart des métaux, donc vulnérables.

Dans les systèmes de conversion de l'énergie marine qu'elle soit localisée en surface (vent et vague) ou en profondeur (courants marin), on utilise les machines électriques en mode générateur aussi bien dans la configuration rotative que linéaire. La version rotative concerne les holo-générateurs (le Pelamis, l'impet), les éolienne offshore, pendant que la version linéaire concerne les générateurs linéaires plan ou tubulaires (installations Archimède Wave swimming). Dans ce présent travail on s'est intéressés aux machines linéaires tubulaires.

L'objet de notre travail porte sur l'analyse du comportement électromagnétique des machines électrique linéaires tubulaire utilisées pour l'exploitation de l'énergie des vagues pour la production de l'électricité. A cet effet la mise en équations électromagnétiques des machines électrique linéaires est faite sur la base des équations de Maxwell, et des relations de milieux. Le modèle magnétostatique et magnétodynamique obtenu est exprimé en terme de potentiel vecteur magnétique en coordonnées cylindrique, intégrant l'aimantation due aux aimants permanents. La simulation du mouvement est opérée en utilisant la technique de la bande géométrique. Ainsi a chaque pas de déplacement de la partie en mouvement, les grandeurs induction magnétique, force magnétique calculée par la formule de Lorentz, flux et inductances obtenues à partir de l'énergie magnétique, sont évaluées. Les codes de calcul sont basés sur la méthode des éléments finis implémentés sous environnement Matlab.

Introduction Générale

L'analyse des performances magnétiques de la machines linéaires est conduite à travers un ensemble de simulations : alimentation de bobines seule, aimants seules, aimants et bobines combinés. Les forces électromotrices induites calculées ont permis de mettre en évidence le mode générateurs.

Ce mémoire est organisé en six chapitres:

Dans le premier chapitre, on va citer les différentes énergies renouvelables. Notre intérêt portera sur les énergies de mer et les systèmes qui sont implémentées.

Le deuxième chapitre est consacré à la description des divers types de machines linéaires employées dans l'industrie.

Dans le troisième chapitre les modèles électromagnétiques obtenues à partir des équations de Maxwell en coordonnées cartésienne et cylindriques sont présentés.

Le quatrième chapitre présente les différentes méthodes de résolutions des modèles d'équations électromagnétiques, en attachant une attention particulière à la méthode des éléments finis utilisée dans ce présent travail.

Le cinquième chapitre consacre la continuité du précédent chapitre en présentant les formulations éléments finis appliquées aux modèles de la machine linéaire tubulaire. Le calcul des grandeurs globales (force magnétique, énergie magnétique) ainsi que les techniques de simulation du mouvement sont aussi présentées.

Dans ce dernier chapitre, les codes de calculs sont validés à travers les applications traitées dans le fonctionnement de machine linéaire tubulaire.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale, et des perspectives.

Chapitre I : Généralités sur les différentes énergies renouvelables

I.1 Introduction	3
I.2 Les ressources énergétiques renouvelables	3
I.3 Les énergies des mers	10
I.4.Eolienne offshore	10
I.5.L'énergie des courants marins (hydro cinétique ou hydrolienne).....	11
I.6.L'énergie thermique des mers (ETM)	12
I.7 L'énergie des vagues (houlomotrice).....	13
I.8 Les systèmes existants	17
I.9 Effet sur l'environnement et sur les créatures de mer	21
I.10 Conclusion	22

I.1 Introduction

Depuis quelques milliers d'années, l'homme cherche à subjuguier certaines forces de la nature et à les faire travailler pour lui, afin d'obtenir un allègement de ses peines. De plus, l'énergie de ses seuls muscles ne lui suffit plus. Il a édifié une civilisation industrielle moderne et, pour la faire fonctionner, il a dompté les énergies naturelles : le vent, les chutes d'eau, la combustion du bois... Bien que fluctuantes et aléatoires, elles répondent à la fois aux problèmes économiques et environnementaux. Et, plus récemment, des énergies moins évidentes cachées sous terre ou difficilement maîtrisables tels que le charbon, le pétrole, le gaz naturel, la fusion nucléaire... En effet, elles sont en grande partie responsables du réchauffement climatique, mais surtout épuisables.

Bien sûr, il faut rester raisonnable en modérant leur exploitation. En puiser une faible partie permettrait de contribuer de façon significative à l'ensemble des besoins énergétiques de l'humanité. De plus, afin de ne pas les exploiter dans les lieux les plus défavorables et de lisser leurs fluctuations, il apparaît indispensable de diversifier les solutions.

Dans ce panel énergétique, l'énergie disponible dans l'environnement marin et plus particulièrement dans les vagues est considérable (140 à 700 TWh /an). De nombreuses recherches dans ce domaine sont réalisées depuis quelques dizaines d'années avec une certaine accélération récente. Cette énergie houlomotrice engendrés par les vagues est une formidable puissance qui peut aussi être exploitée pour générer de l'électricité. L'énergie des vagues, l'énergie du futur? [4]

I.2 Les ressources énergétiques renouvelables

Les ressources énergétiques renouvelables sont, à notre échelle de temps, celles qui sont dispensées continûment, par la nature. Sur la terre, elles ont pour origine, par ordre d'importance quantitative, le rayonnement solaire, la chaleur du noyau terrestre qui migre vers la surface terrestre et les interactions gravitationnelles de la lune et du soleil avec les océans. L'humanité consomme annuellement, en ce début du troisième millénaire, très approximativement $140 \cdot 10^{12}$ KWh d'énergie primaire (biomasse non commerciale comprise), soit une quantité importante de l'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre. La production d'électricité mondiale quant à elle représente environ $17 \cdot 10^{12}$ KWh/an (Figure I.1) [5].

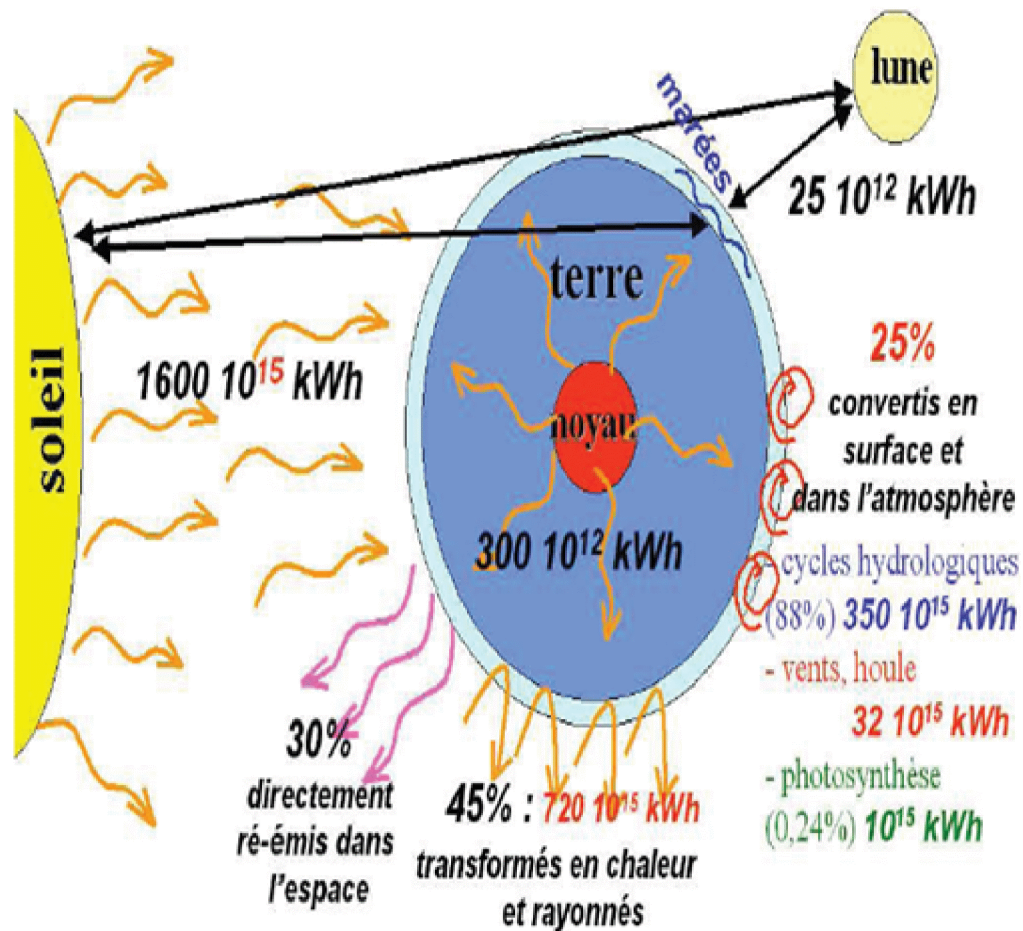


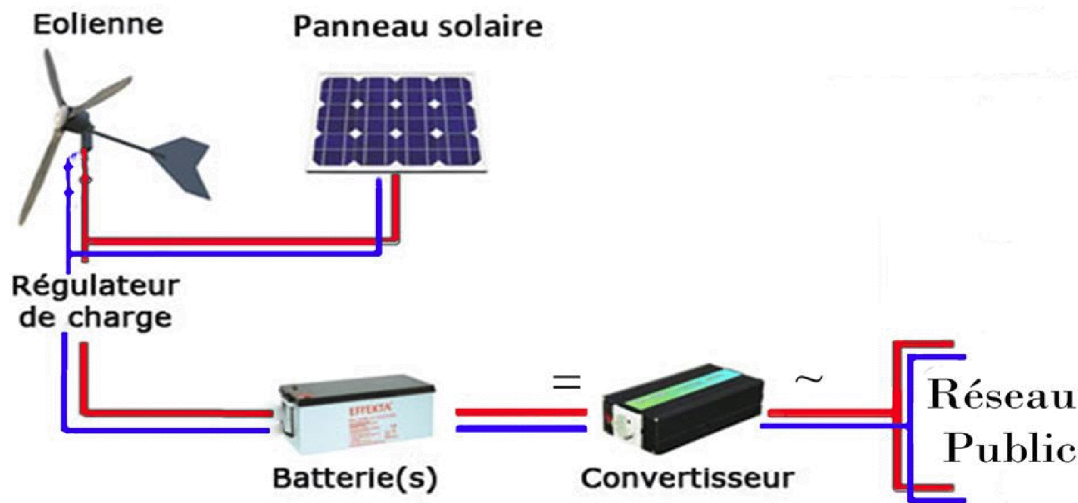
Figure (I.1): Sources et répartition quantitative annuelle des ressources énergétiques renouvelables de la Terre [5].

I.2.1 L'énergie d'origine solaire

L'énergie solaire est une énergie réellement inépuisable et abondante. En 12 heures, par exemple, l'énergie solaire arrivant sur terre est supérieure au total des énergies fossiles connues et prévisibles. Pour fixer un autre ordre de grandeur, l'énergie solaire qui arrive sur le sol est 10 000 fois supérieure à ce que le monde consomme aujourd'hui. Il serait vraiment dommage de ne pas utiliser une telle source d'énergie. Pourtant l'énergie solaire représente aujourd'hui 0.04 % de la consommation d'énergie [3].

Les cellules photovoltaïques convertissent les radiations solaires en énergie électrique. On peut aussi utiliser la chaleur rayonnée par le soleil pour chauffer de l'eau et actionner des turbines.

Les avantages que cette énergie nous offre sont, le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz ni le déchet toxique par son utilisation. Les systèmes photovoltaïques sont avantageux par rapport aux options de concurrence de puissance. De plus ils ne font pas de pollution, sans émissions ou odeurs discernables, ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sans surveillance pendant de longues périodes. Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la disponibilité des systèmes. Les systèmes photovoltaïques fonctionnent avec du soleil, donc leur inconvénient majeur est le rayonnement du soleil, qui dépend de l'intensité d'ensoleillement. Les cellules solaires sont encore lointaines pour produire une fraction significative de l'énergie du monde requise en raison de la charge de placement initiale. Cependant, le prix diminue considérablement par rapport à la puissance maximale en Watt [12].

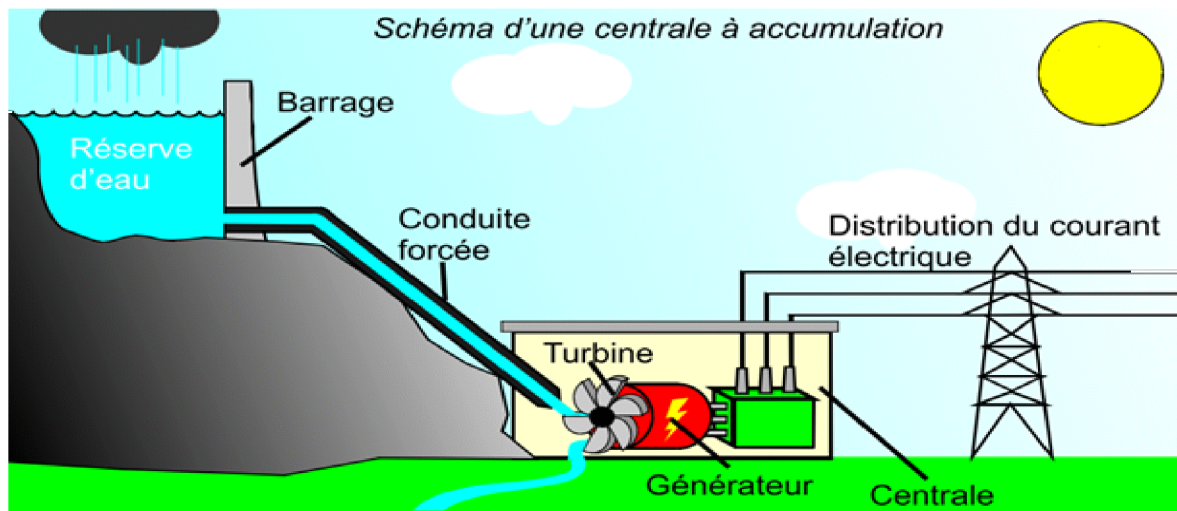


Figure(I.2) : Schéma de la conversion de l'énergie solaire.

L'Algérie est l'un des pays qui présente une diversité de sites pouvant être exploités dans l'utilisation de l'énergie solaire. Le rayonnement de la région près de la mer est influencé par les saisons. Les zones du nord de l'Algérie sont à ciel - couvert plus que ceux du sud. Les régions Sahariens reçoivent une quantité plus grande d'énergie mais sont caractérisées par une température de l'air plus élevée. En raison de cette diversité dans le climat, l'ensoleillement moyen global au plan horizontal reçu varie entre 4,5 et 7.5 KWh/m². En tenant compte de cette diversité, l'Algérie peut être divisée en 8 zones climatiques qui ont approximativement un ensoleillement homogène.

I.2.2 L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique, est une énergie produite grâce à la force de l'eau. Elle utilise une turbine qui tourne sous la pression de l'eau et entraîne un générateur qui transforme le mouvement de la turbine en électricité. Au niveau mondial, le potentiel de l'énergie hydraulique est de l'ordre de 1 400 GW moyens, soit près de 90 % de la production électrique actuelle [3].



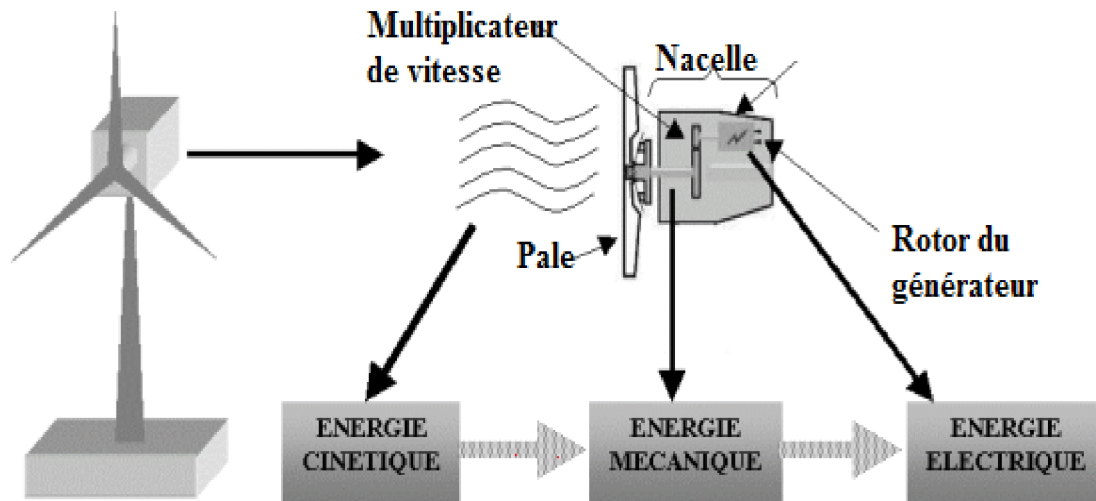
Figure(I.3) : Schéma d'une centrale à accumulation [3].

I.2.3 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne également exploitée depuis longtemps (propulsion à voile, moulins à vent, pompes à eau), représente une ressource énorme, $32 \cdot 10^{15}$ kWh, dont la part terrestre exploitable est estimée à $50 \cdot 10^{12}$ kWh/an. La puissance récupérable par les aérogénérateurs modernes est de l'ordre de 500 W par m^2 balayés pour des vents de 15 m/s avec des productivités annuelles dans des sites [5]. La figure (I.4) représente un schéma détaillé sur les composantes d'une éolienne.

Une éolienne (ou "aérogénérateur") utilise la force du vent pour actionner les pales d'un rotor. L'énergie mécanique produite par la rotation des pales est transformée en énergie électrique grâce à un générateur. Une éolienne se compose d'un mât pouvant mesurer de 10 à 160 m de haut selon la puissance de la machine. Sur le mât est installée une nacelle renfermant la génératrice électrique qui est entraînée par un rotor de 2 ou 3 pales mesurant entre 5 et 10 m de diamètre. La puissance d'une éolienne terrestre peut aller jusqu'à 3 MW et de 2 à 6 MW pour les éoliennes de mer (offshore).

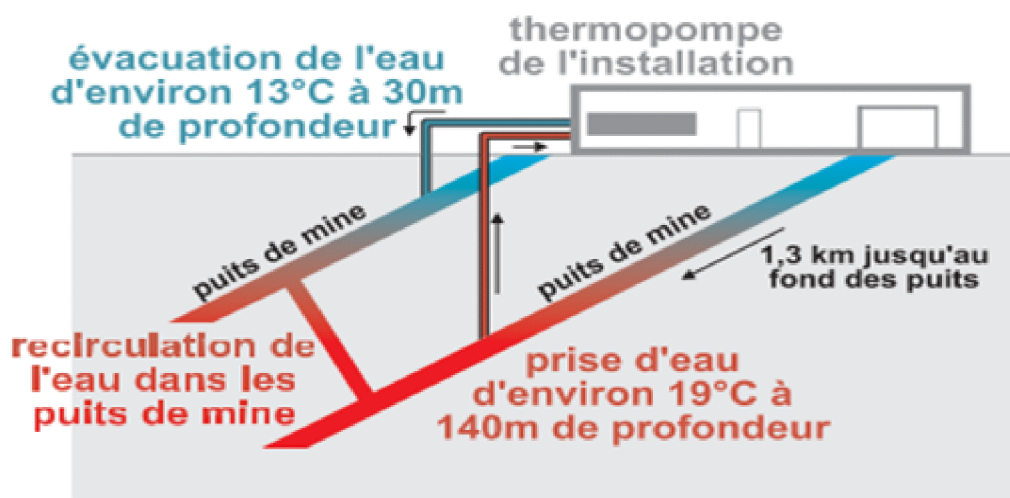
Une éolienne fonctionne uniquement lorsqu'il y a du vent. Elle tourne en effet lorsque la vitesse du vent s'établit entre 15 et 90 Km/h, vitesse au-delà de laquelle l'éolienne s'arrête automatiquement pour des raisons de sécurité. L'électricité ainsi produite est acheminée par un câble électrique souterrain jusqu'au poste de livraison.



Figure(I.4) : Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.2.4 La géothermie

L'énergie géothermique provient des désintégrations de l'uranium et du thorium contenus dans la terre [3]. Le noyau terrestre en fusion dégage une énergie annuelle d'environ $300 \cdot 10^{12}$ KWh. Les réserves exploitables avec les technologies actuelles sont d'environ $40 \cdot 10^9$ KWh en haute température (150 à 350°C, utilisée pour la production d'électricité) [5].



Figure(I.5) : Schéma fonctionnelle d'une centrale géothermie [11].

I.2.5 La biomasse

La combustion de la biomasse correspond à son oxydation complète en présence d'air. Cette technique permet de générer de l'énergie utilisée pour le chauffage, la production d'électricité ou les deux [13]. La part renouvelable annuelle (environ 20%) de la biomasse, produit de la photosynthèse, représente une énergie d'environ $800 \text{ à } 900 \cdot 10^{12}$ KWh. On estime que la part aisément exploitable atteint $60 \cdot 10^{12}$ KWh [5].

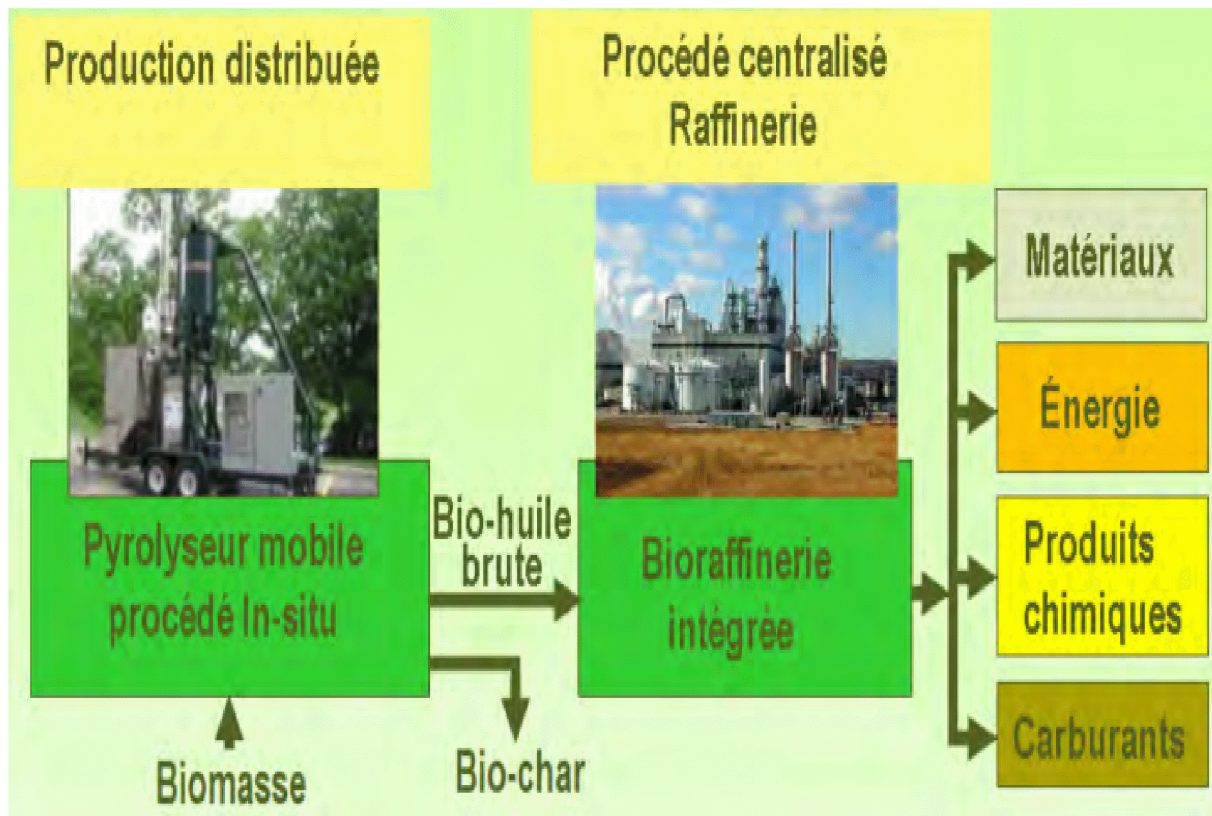


Figure (I.6) : Schéma d'une ligne de production biomasse [13].

I.2.6 Les interactions gravitationnelles Terre-Lune-Soleil

Les marées résultent des interactions Terre-Lune-Soleil. L'énergie annuelle dissipée dans les courants de marée représente environ $25 \cdot 10^{12}$ kWh. La partie exploitable est assez difficile à déterminer. On l'estime entre $270 \text{ et } 500 \cdot 10^{19}$ kWh (l'usine de la Rance produit annuellement : $0,54 \cdot 10^{19}$ kWh). Mais on imagine aujourd'hui placer des turbines sous-marines à la façon des éoliennes qui permettent d'accroître le potentiel tout en réduisant les contraintes environnementales.[5]

I.2.7 L'énergie de la houle

Comme la majorité des énergies renouvelables, l'énergie des vagues découle de l'énergie solaire. En effet, la principale cause de formation des vagues est le vent. Or, nous savons que le soleil, en chauffant différemment les couches atmosphériques, crée des masses d'air chaud ainsi que des masses d'air froid. Par la suite, l'air chaud léger monte de façon à créer une zone de basse pression contrairement à l'air froid qui descend. La zone de basse pression va aspirer l'air froid, de sorte que de l'air bouge et se met en mouvement créant le vent.

Si ce phénomène dure assez longtemps à la surface de mer, il se forme une succession de vagues régulières : la houle [4].

L'énergie de la houle nette disponible est évaluée de 140 à 700 TWh/an d'après le World Energy Council (WEC), soit 1 à 5 % de la demande annuelle mondiale en électricité. La puissance moyenne par mètre de front de vague possède des valeurs comprises entre 10 et 100 kW/m selon les sites [5].

On estime que si moins de 0,1 % de l'énergie renouvelable au sein des océans pouvait être transformée en électricité, la quantité produite suffirait à satisfaire plus de 5 fois les besoins en énergie actuels du monde entier.

I.2.8 Possibilités d'exploitation des différentes énergies renouvelables

Notons que ce ne sont pas forcément les sources les plus importantes en quantité qui sont les plus avantageuses. Les meilleures sources renouvelables dépendent de nombreux paramètres, notamment des particularités du site (la place où est mis le dispositif). Ainsi, toutes les sources évoquées trouvent des débouchés. Précisons enfin que leur exploitation massive peut aussi être source de perturbation de l'environnement et/ou subir le refus de la population. Un trop faible rendement de conversion est parfois opposé aux systèmes de conversion des ressources renouvelables. Cette critique est généralement sans fondement ; en effet, lorsque l'on exploite des ressources renouvelables, un faible rendement est souvent gage d'une moindre perturbation. Il ne faut cependant pas qu'un trop faible rendement se traduise par un coût, notamment un coût écologique, inacceptable des convertisseurs fonctionnant à partir des ressources primaires gratuites [4][5][6].

I.3 Les énergies des mers

La mer est un milieu fluide riche en flux énergétiques qui peuvent être exploitées sous les formes suivantes [9] :

- **Energie éolienne offshore:** Le vent est nettement plus fort en mer qu'à terre. Il s'établit sur les vastes étendues libres d'obstacles.
- **Energie des vagues (houlomotrice) :** Le vent soufflant sur de grandes surfaces marines crée des vagues et concentre ainsi l'énergie éolienne. La houle peut voyager sur de très longues distances et apporter sur une côte de l'énergie qui a été collectée fort loin.
- **Energie des courants de marées:** Les marées provoquent de puissants courants qui sont concentrés en certains endroits près des côtes.
- **Energie thermique des mers:** Dans l'océan de la zone intertropicale, la différence de température entre l'eau de surface et l'eau profonde dépasse 20°C. L'utilisation d'une machine thermodynamique permet de convertir une partie de la chaleur de l'eau chaude en énergie électrique.

I.4.Éolienne offshore

L'énergie éolienne offshore (figure (I.7)) n'est pas proprement dite une énergie marine, mais son exploitation en mer présente des caractéristiques à un avantage qui est liées au vent car, il est plus fort et plus constant en mer qu'à terre, si bien que la productivité des éoliennes est meilleure. En plus, La mer offre de grands espaces libres d'obstacles, ou l'implantation des machines est possible en concertation avec les autres usagers de la mer. L'implantation d'éoliennes en mer est plus difficile qu'à terre.

Le fait que l'éolienne soit entourée d'eau amène en effet des contraintes relative au tant que l'éolienne est soumise mécaniquement non seulement aux efforts du vent sur les pales et la structure, mais aussi aux efforts créés par la masse d'eau qui l'entoure. Ainsi le dimensionnement pour la tenue au chargement extrême et à la fatigue sera différent pour l'éolienne offshore (trainée du courant, impacts de vagues, parfois déferlantes, en plus des efforts du vent et des tempêtes) que pour l'éolienne à terre.

La maintenance des éoliennes est plus compliquée qu'à terre. Il n'est pas toujours possible d'accéder aux éoliennes, en particulier lorsque le temps est mauvais. Si une panne survient, il peut se passer plusieurs jours avant réparation, ce qui entraîne une perte de production. Donc, l'installation des éoliennes en mer ne peut être réalisée que par des moyens d'intervention

suffisamment puissants pour offrir une assise stable à la grue chargée du montage des différents éléments [9].

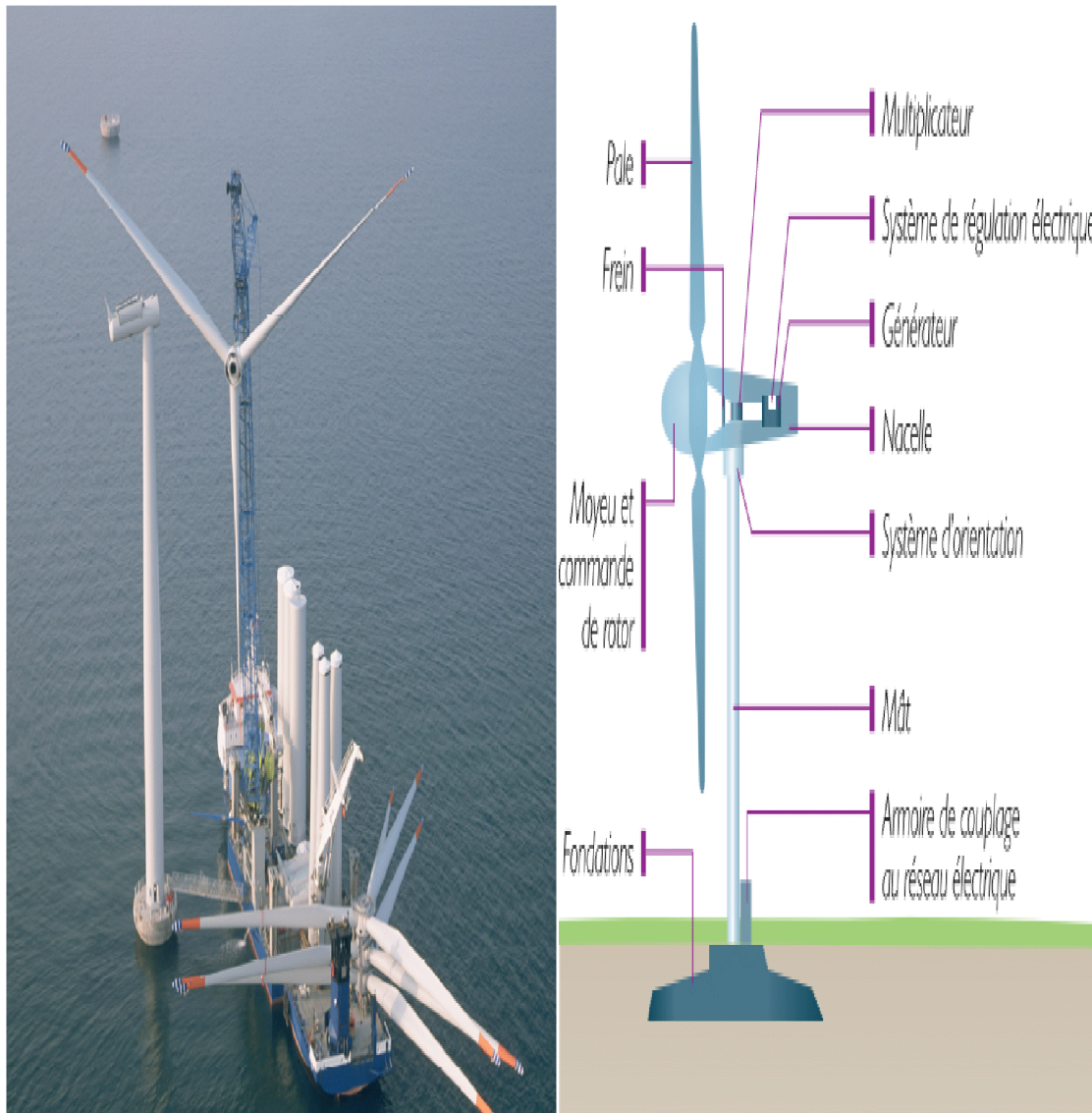


Figure (I.7) : Éoliennes de 3,6MW à Arklow Bank (Irlande) [9].

I.5.L'énergie des courants marins (hydro cinétique ou hydrolienne)

L'énergie hydrolienne correspond à l'exploitation de l'énergie cinétique des masses d'eau mises en mouvement par les courants marins. Une installation hydrolienne, peut être assimilée à une éolienne sous-marine comme dans le cas des éoliennes [9].

Les hydroliennes sont prévues pour fonctionner en milieu sous-marin comme le montre la figure (I.8). Elles doivent être très robustes et ne nécessiter que le minimum d'entretien.

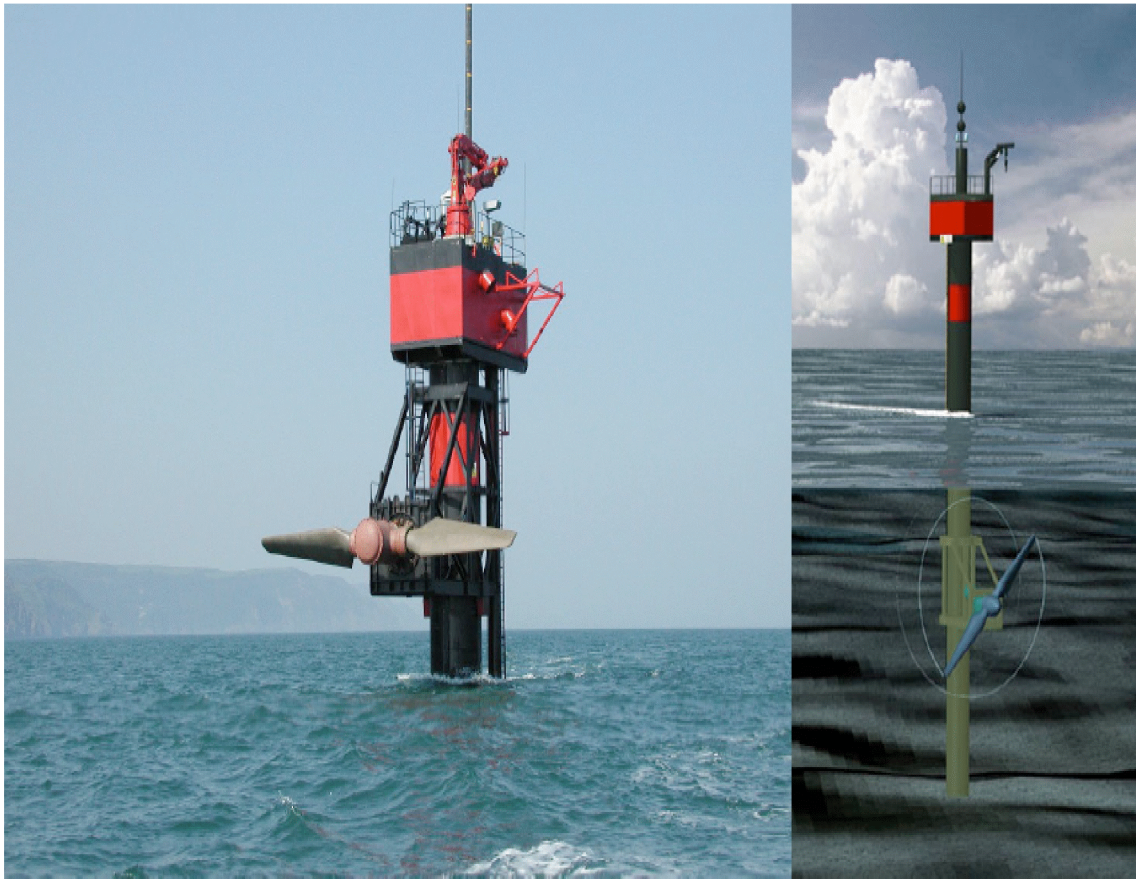


Figure (I.8): Photographie d'un prototype d'hydrolienne de 300 KW [9].

I.6.L'énergie thermique des mers (ETM)

La différence de température entre la surface et le fond y est en effet suffisante pour alimenter une machine thermique avec un gradient minimum de 20°C et assurer ainsi un rendement suffisant au regard des techniques disponibles. Ce phénomène naturel peut être utilisé pour produire de l'énergie. La ressource et le principe de cette production sont connus sous le nom d'Energie Thermique des Mers (ETM).

Une centrale d'ETM se compose d'un ensemble évaporateur-turbine-condenseur, des conduites et des pompes d'alimentation en eaux chaude et froide pompées en surface et en profondeur de l'océan, et d'une infrastructure abritant tous les équipements nécessaires a son fonctionnement, tel que détaillé par la figure (I.4) [9].

Ce dispositif est centré sur un fluide de travail qui passe de l'état liquide à l'état vapeur au contact de l'eau chaude (eau de surface). La pression produite par la vapeur passe dans un turbogénérateur et entraîne une turbine. Après avoir perdu sa pression, le gaz passe dans un condenseur pour retourner à l'état liquide au contact de l'eau froide pompée depuis le fond.

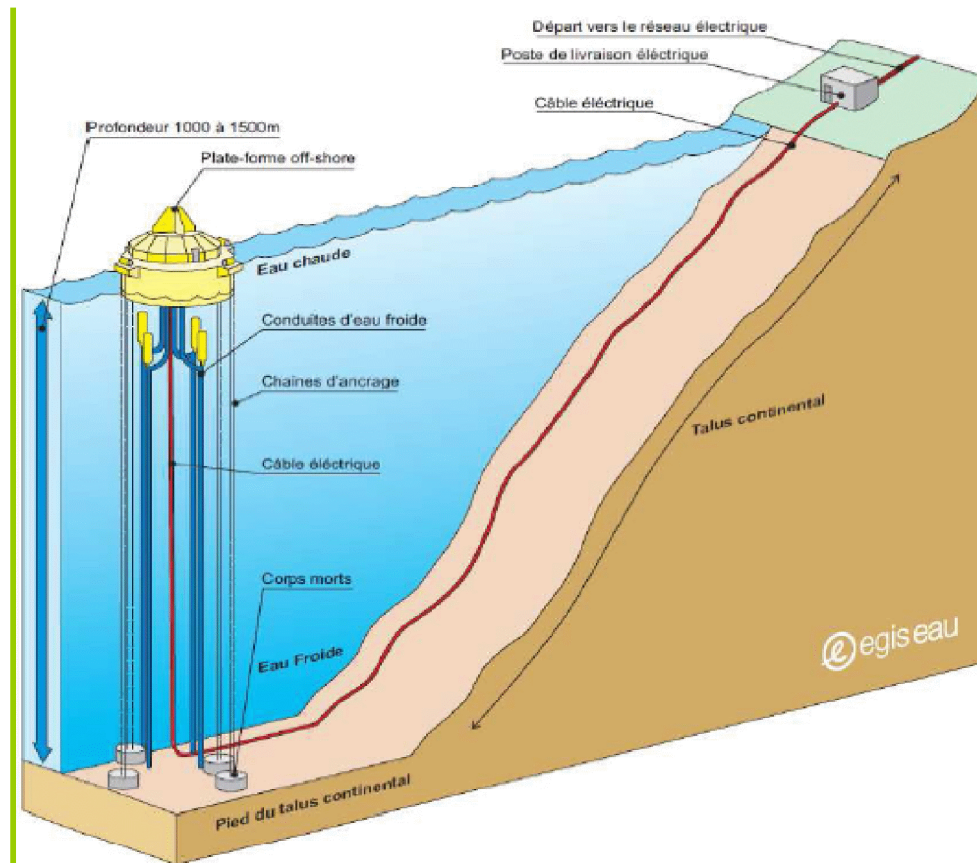


Figure (I.9): Schéma de principe d'une installation (ETM) offshore [7].

I.7 L'énergie des vagues (houlomotrice)

Les sources d'énergie renouvelable sont seulement 9% de la production de l'électricité totale du monde. La majeure partie de l'énergie du monde est assurée par les formes conventionnelles d'énergie (nucléaire, charbon et gaz naturel). Parmi toutes les ressources renouvelables, nous allons nous intéresser plus particulièrement à l'énergie des vagues.

La houle transporte une énergie considérable, résultant de l'effet du vent sur les surfaces marines. La puissance moyenne de la ressource est quantifiée en KW par mètre linéaire. La figure (I.10) présente les ressources énergétiques de la houle disponible en Europe. Les côtes du Royaume-Uni, de la France et du Portugal sont particulièrement bien exposées avec des valeurs de 30 à 60 kW/m [5].

L'énergie houlomotrice ou énergie des vagues désigne la production d'énergie électrique à partir de la houle, c'est-à-dire à partir de vagues successives nées de l'effet du vent à la surface de la mer et parfois propagées sur de très longues distances. Il existe différents dispositifs pour exploiter cette énergie. De nombreux systèmes sont actuellement à l'étude, certains sont déjà commercialisés mais aucun n'est arrivé au stade de la maturité industrielle.

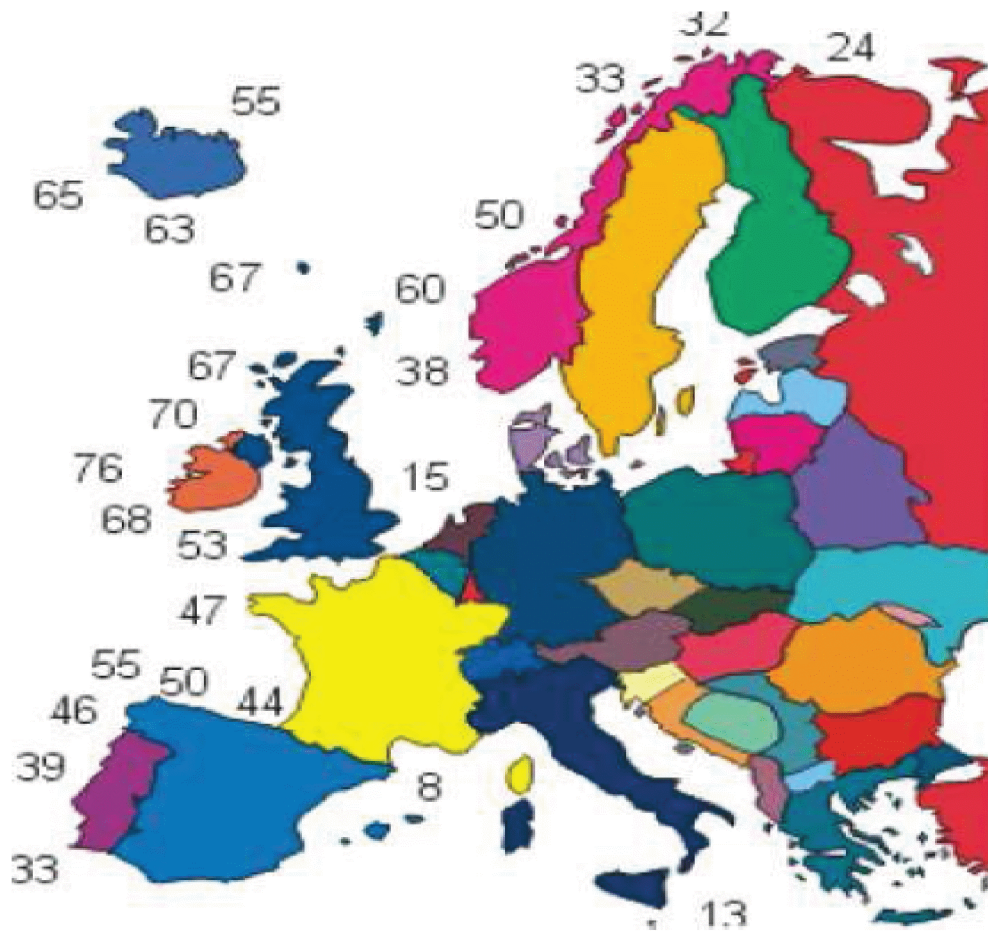


Figure (I.10): La carte des ressources dans le monde [5].

I.7.1 Caractéristiques énergétiques de la houle

Les vagues d'océan sont créées quand le vent souffle au-dessus de l'océan. L'intensité des vagues peut être prévue plusieurs jours avant leur arrivée [8].

L'amplitude d'onde, la période des vagues et la profondeur de l'eau sont trois paramètres qui forment le climat des vagues. Ces variations de paramètre doivent être soigneusement étudiées avant de concevoir les systèmes du Convertisseur d'Energie de Vague d'Océan (CEVO). Des systèmes de commande avancés requis pour accorder des dispositifs à de diverses fréquences pouvant être développés sont basés sur le climat des vagues.

La longueur de vague λ , est la distance horizontale entre deux crêtes successives de vague, sont représenté par la figure (I.11).

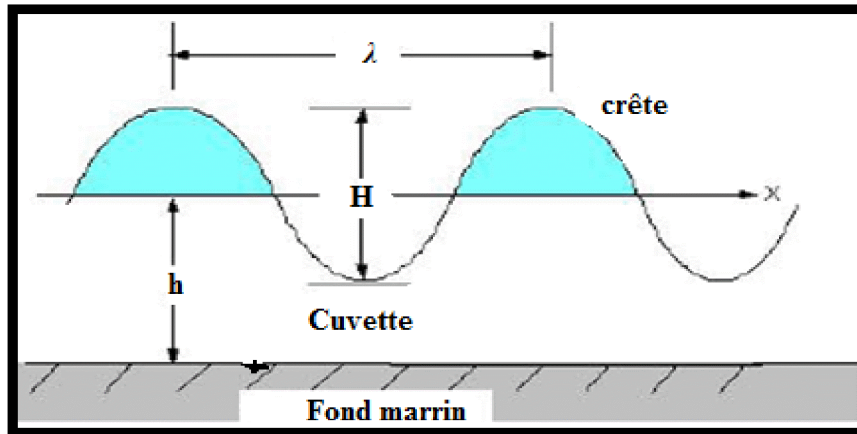


Figure (I.11) : Les caractéristiques de la houle [5].

I.7.2 Principes techniques d'exploitation de l'énergie des vagues

Il existe un vaste inventaire de solutions houlomotrices, certaines d'entre elles étant immergées, d'autres installées en surface, sur le rivage ou au large. Les systèmes de capture d'énergie varient d'un prototype à un autre : capture d'énergie mécanique en surface (ondulations) ou sous l'eau (translations ou mouvements orbitaux), capture des variations de pression au passage des vagues (variations de hauteur d'eau) ou encore capture physique d'une masse d'eau (via une retenue). On distingue quatre grands principes techniques.

a. Déferlement

Dans ces dispositifs, l'eau déferle sur une pente douce pour remplir un réservoir situé au dessus du niveau de la mer. L'eau stockée est alors évacuée entraînant dans le même temps une turbine reliée à un générateur électrique figure (I.12). Le principal avantage de ces systèmes est de lisser naturellement la puissance récupérée. Le réservoir joue le rôle de capacité dans laquelle on stockerait de l'énergie potentielle de pesanteur [8].

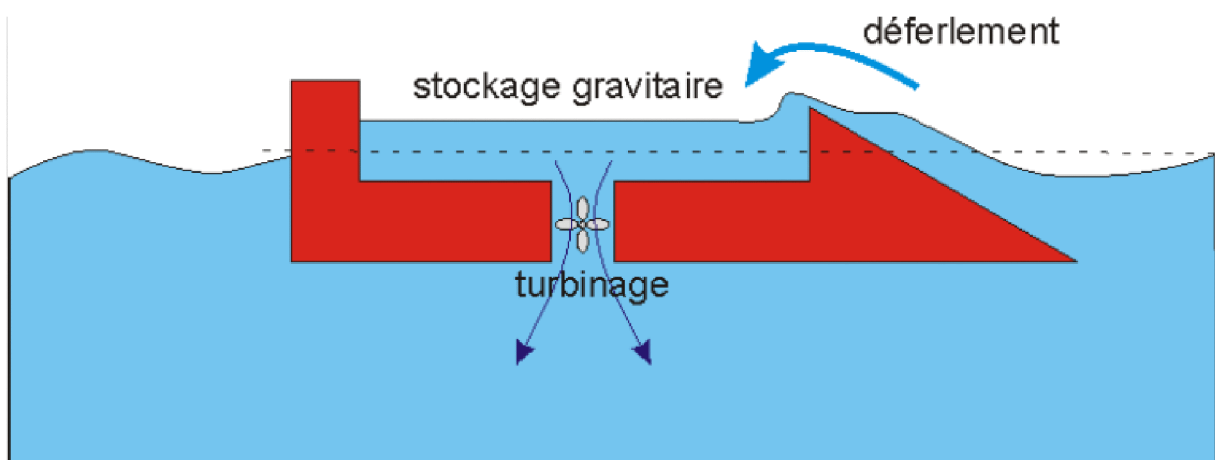
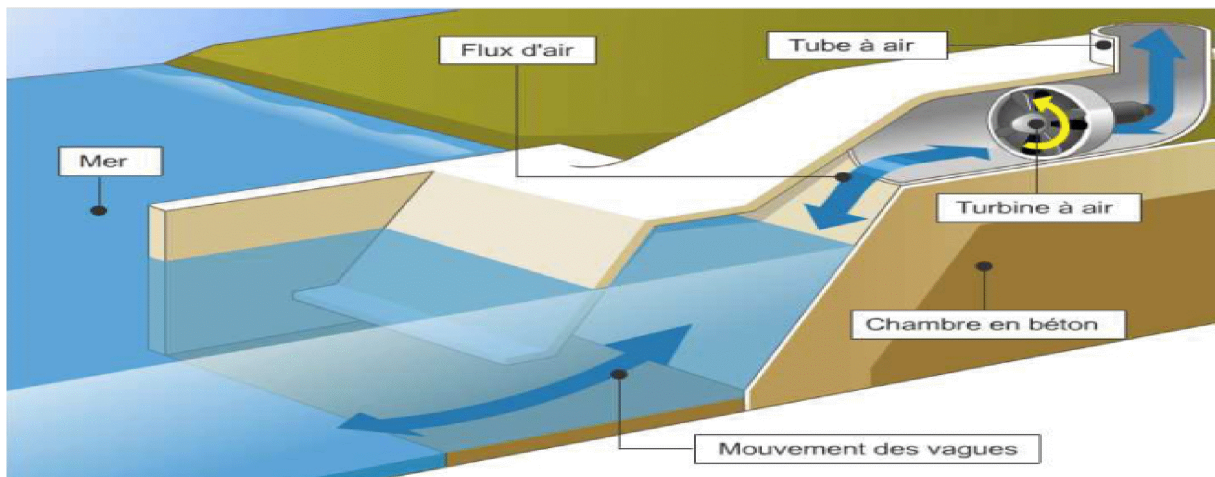


Figure (I.12) : Principe du système à déferlement [10].

b. Colonne d'eaux oscillante

Le principe de ces systèmes, figure (I.13), est de se servir des variations de hauteur de la surface libre de la mer comme d'un piston. Les oscillations de la surface libre créent, dans une cavité, des variations de pression avec l'extérieur. Le flux d'air ainsi créé à travers un orifice permet d'entraîner une turbine reliée à un alternateur. La turbine est conçue de telle manière que son sens de rotation soit indépendant du sens de circulation du flux d'air [8].



Figure(I.13) : Principe d'une colonne d'eau oscillante [10].

c. Flotteurs en surface :(système oscillants (rotation) flottants)

Ce système est composé d'une suite de longs flotteurs qui s'alignent dans le sens du vent perpendiculairement aux vagues comme le montre la figure (I.14), et dont la tête est ancrée au fond marin par un câble. Les vagues créent une oscillation de la chaîne, cette oscillation est exploitée aux articulations pour comprimer un fluide hydraulique qui entraîne à son tour une turbine. Il s'agit du procédé le plus connu exploitant l'énergie houlomotrice.

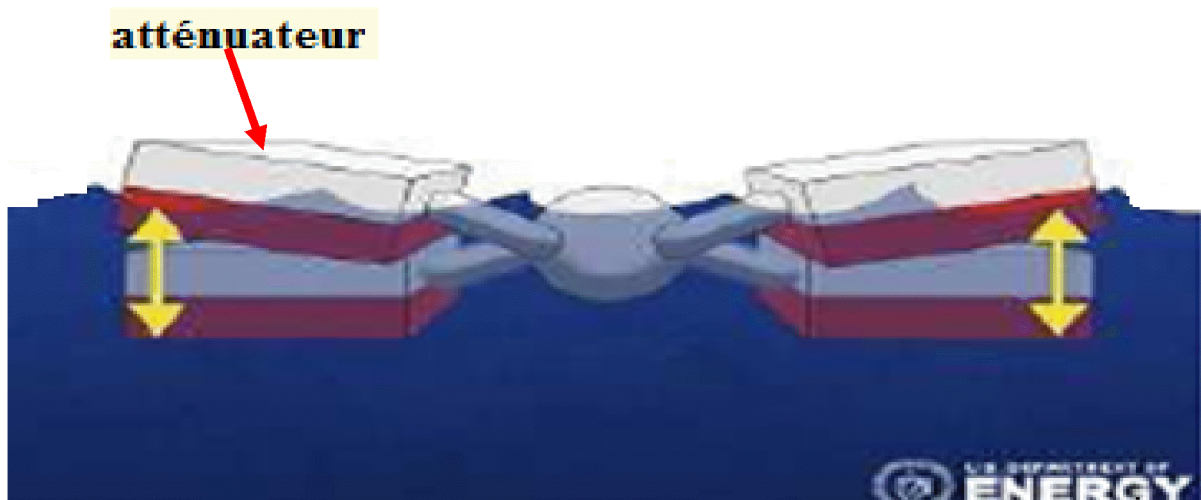


Figure (I.14) : Système composé d'une suite de longs flotteurs [4].

d. Systèmes oscillants (translation) immergés

Ce sont des petits dispositifs en comparaison à la longueur d'ondes des vagues, dont il existe plusieurs variantes. Ils peuvent soit osciller (sorte de volet oscillant dans les deux sens avec le passage des vagues), soit actionner une sorte de pompe à piston (vérin hydraulique), figure (I.10).

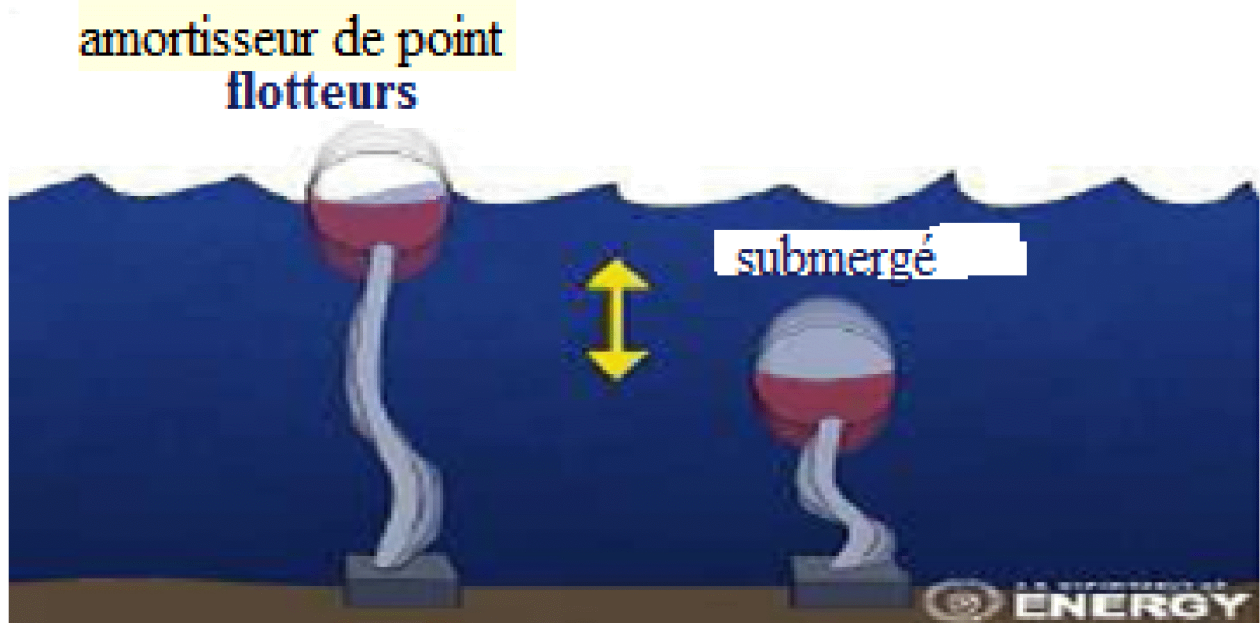


Figure (I.15) : Systèmes oscillants (translation) immergés [4].

La machine est ancrée au sol, la variation des forces de pression générées par les vagues, provoquent des oscillations verticales dont l'exploitation permet de produire de l'énergie électrique.

I.8 Les systèmes houlogénérateurs existants

Sur la surface des mers des flotteurs spécifiquement conçus pour transformer les mouvements des vagues en forces mécaniques pour produire de l'énergie renouvelable.

Il existe aujourd'hui une multitude de technologies pouvant récupérer cette énergie en vue de produire de l'électricité. Certains systèmes extraient l'énergie des vagues de surface tandis que d'autres utilisent l'énergie des fluctuations de pression sous la surface de l'eau. Certains systèmes sont fixes alors que d'autres suivent le mouvement des vagues.

I.8.1 Le Pelamis

De tous les dispositifs créés, le plus avancé est sans doute celui de la ferme britannique Océan Power Deleuvry, qui offre aujourd'hui une véritable implantation industrielle. Baptisé selon un monstre de la mythologie Pelamis, qui désigne serpent de mer en Grecque, figure (I.16). Pelamis est le système le plus mature actuellement, il est constitué de quatre cylindres métalliques flottants reliés entre eux par trois articulations à deux degrés de liberté, et ressemblant à un serpent de 4 à 6 m de diamètre et d'une longueur totale de 123 m (700 tonnes, dont 380 tonnes d'acier). Sa forme générale lui permet de supporter des houles très variées et de bien exploiter leur énergie [5] [4].

Son système d'ancrage agile, qui tire la pointe avant de l'engin vers le bas le force à stationner face aux vagues tout en le laissant assez agile pour pouvoir se balancer. En outre, le rendement énergétique du pelamis est pratiquement constant. Compris entre 70 et 80%. L'électricité produite est transportée par des câbles placés sur les fonds marins vers la côte. De plus, l'appareil peut être commandé à partir d'une station. En effet, il est possible de faire remuer d'avantage le Pelamis dans les petites vagues pour optimiser l'énergie et, à l'inverse, limiter ses mouvements dans les grosses vagues pour réduire les risques de rupture. Chaque vérin est capable de produire 250KW, et chaque machine est constituée de 3 vérins ce qui produira donc 750KW.

La première véritable centrale houlomotrice à base de Pelamis été édifiée au large de Povoas do Varzin à 320 km au Nord de Lisbonne (figure (I.17)). Comptant 3 Pelamis, et produisant ainsi 2,25 MW par an, elle a coûté 8.5 millions d'euros. Le Portugal estime pouvoir installer 28 autres machines capables d'alimenter 15.000 habitants, dans un parc d'exploitation qui s'étalera sur 1Km², dont la production atteindra 23 MW.

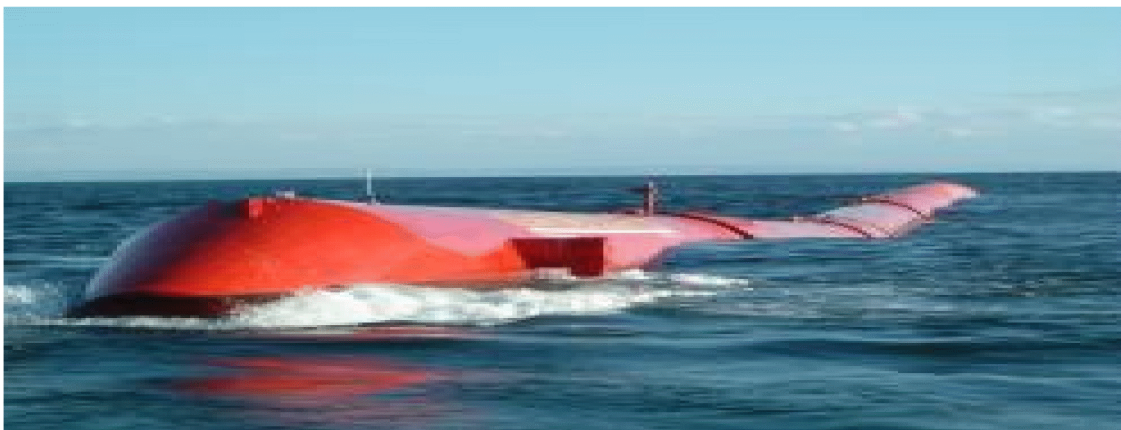
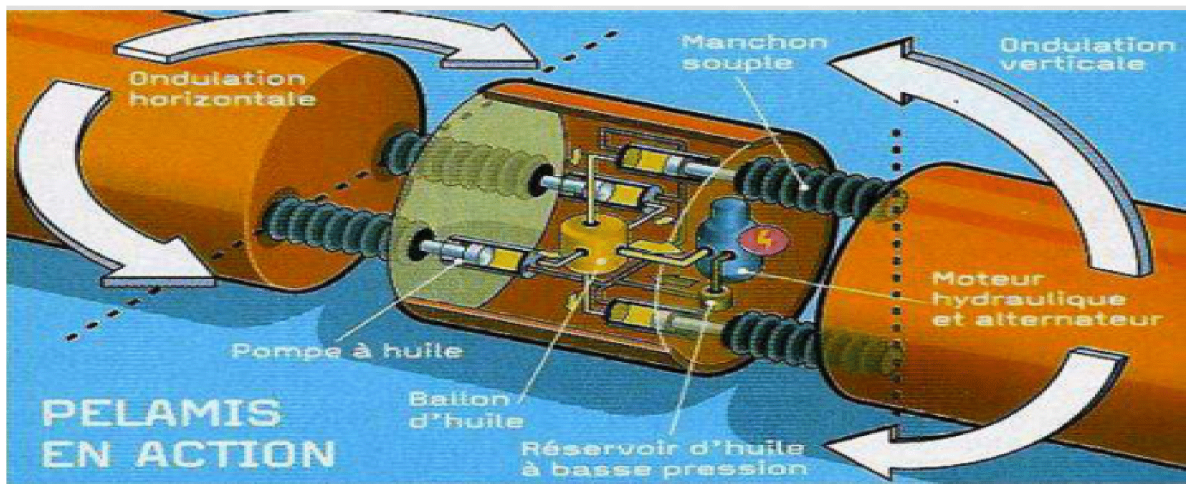


Figure (I.16) : Photographie du système Pelamis [10].



Figure(I.17) : Le PELAMIS en action.

I.8.2 Le Limpet

Limpet est constituée de deux éléments de base: un collecteur pour capter l'énergie de la marée et une turbo-génératrice pour transformer cette énergie en électricité. Un fossé de 25 m de large a été creusé dans des falaises et recouvert d'une structure en béton formant une cavité creuse. La marée y pénètre et comprime l'air qui, à son tour, actionne les turbines au sommet de la construction. Cette structure, extrêmement solide, peut résister aux tempêtes les plus violentes [12].

La centrale électrique "Limpet 500" la société Wavegen installée sur l'île d'Islay, au large de la côte Ouest de l'Écosse en novembre 2000, était le premier générateur commercial de l'énergie des vagues connecté au réseau électrique. Ce générateur côtier utilise une colonne d'eau oscillante côtière à l'intérieur d'une structure en béton, figure (I.17). La mer entre et sort librement en partie basse de la structure et une turbine placée dans un orifice en partie haute, transforme les variations de pression en courant électrique. Il récupère donc l'énergie de l'air comprimé par la force des vagues déferlantes et sa turbine a été développée pour tourner dans le même sens, indépendamment du sens d'entrée de l'air, maximisant ainsi la capacité de production. A la différence des concepts précédents, ce système est sur le rivage, il ne crée donc aucune gêne à la circulation des bateaux et ne nécessite pas de câble sous-marin pour évacuer l'énergie. Cependant, il existe un désavantage esthétique, mais il suffirait de cacher le dispositif dans un recoin de falaise artificiellement créé. Ce système Limpet fonctionne depuis Novembre 2000, il produit 500 kW et il fournit à 400 foyers écossais de l'électricité à consommer [11].

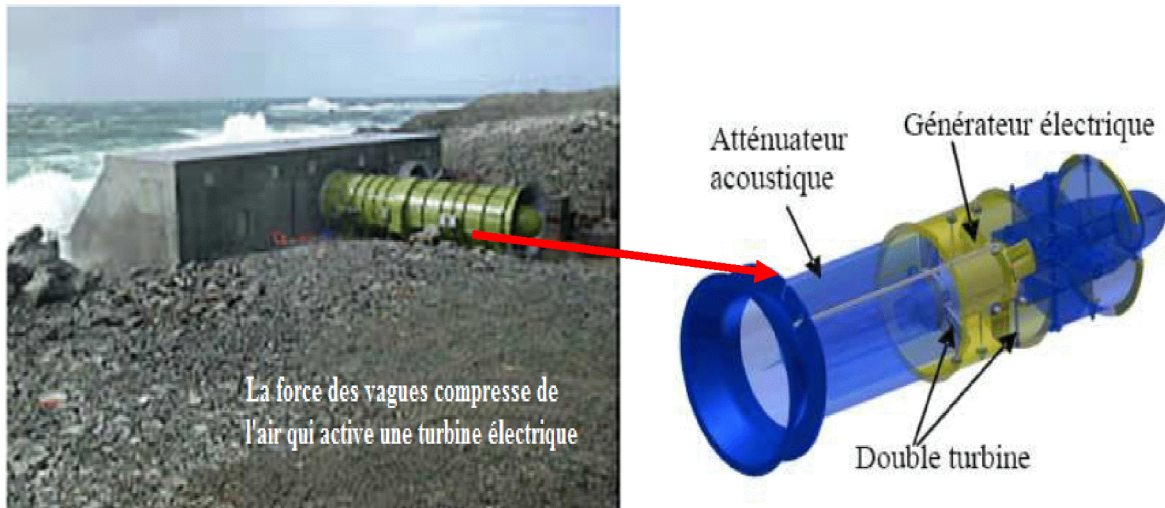


Figure (I.17): Photographie du système l'impet et schéma de la turbine [11].

I.8.3 Archimède Wave Swing (AWS)

La version pilote, testée en 2004 au large du Portugal, à une puissance nominale de 1 MW (moyenne sur cycle) et crête de 2 MW. Chaque unité de production se trouve immergée à 8 m sous la surface, un flotteur cylindrique de 21 m de hauteur et 9,5 m de diamètre est mis en oscillation par les vagues et comprime l'air piégé entre lui-même et un cylindre ancré au fond. Il entraîne la partie mobile d'un générateur linéaire direct synchrone à aimants. La structure et la photographie du générateur linéaire du prototype est présentée par la figure (I.18) [4][5].

L'énergie annuelle récupérée annoncée est de 1.64 GWh sur le site pilote portugais, soit 1640 heures à puissance nominale. Sur la version pilote et pour des raisons de coût, la partie mobile du générateur linéaire est plus longue de seulement trois mètres que la partie fixe. Cela grève évidemment les capacités du système sur les mouvements de forte amplitude. Pour éviter d'avoir des mouvements d'amplitude trop importante, le système est prévu avec des butées mécaniques.

Le système possède des amortisseurs hydrauliques eux aussi prévus pour limiter les mouvements. Cela évite au générateur linéaire de devoir fournir des forces trop importantes pour avoir des mouvements raisonnables, mais l'énergie récupérée est en contre partie plus faible.

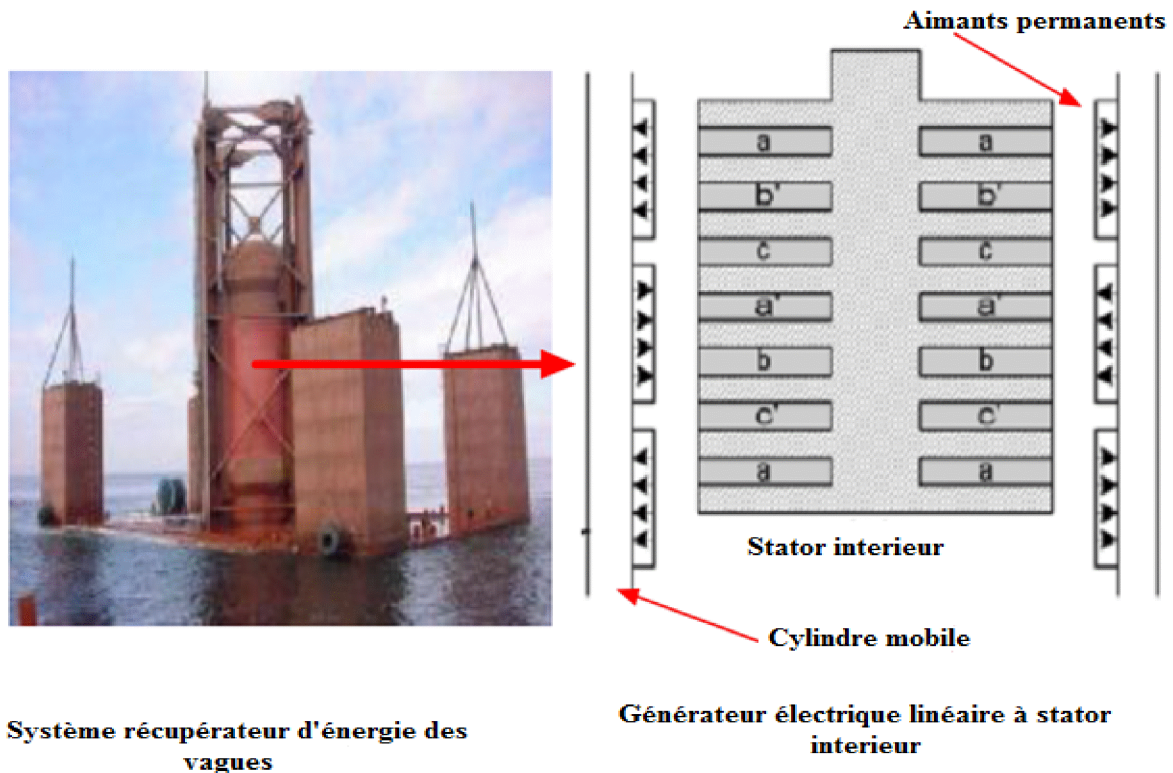


Figure (I.18) : Schéma et photographie du système AWS [19].

I.9 Effet sur l'environnement et sur les créatures de mer

Les convertisseurs d'énergie de vague posent plusieurs risques environnementaux. L'effet principal est sur la vie en mer et la navigation de bateau. La communauté de développement d'énergie des vagues doit résoudre ces problèmes au profit de la société.

L'émission de bruit au-dessous et au-dessus de l'eau de mer doit être gardée dans certaines limites acceptables. Les dispositifs doivent être protégés pour éviter le contact avec les créatures de mer. Les champs électromagnétiques et les vibrations ont l'effet sur la reproduction mammifère de sonar et de poissons. Les principaux effets à considérer en phase travaux sont le bruit (dans l'eau et dans l'air), le remaniement des fonds, les potentielles remises en suspension de matériaux associées, ainsi que le risque de pollution accidentelle par les engins de travaux. Les risques de pollution sont difficiles à prévoir. Les mesures de réduction de ces risques doivent être bien définies en amont des travaux et appliquées avec rigueur pendant les opérations. Les câbles sont une composante commune à toutes les énergies marines renouvelables. Leurs impacts en phase opérationnelle se manifestent essentiellement au travers des champs électromagnétiques qu'ils génèrent dans le milieu et des hausses de température des matériaux.

Les avantages qu'elle peut offrir sont, sa gratuité sans nécessité de carburant auxiliaire, et aucun déchet produit. N'est pas cher à exploiter et entretenir et elle peut produire une grande quantité d'énergie. Les inconvénients de cette dernière sont : sa dépendance des vagues, a besoin d'un site approprié où les vagues sont toujours fortes, certains modèles sont bruyants, et doivent être capables de résister aux conditions météorologiques très difficiles [4].

I.10 Conclusion

La mer est riche en énergies renouvelables, d'origine thermique et mécanique. Leur exploitation compatible avec le développement ne génère pas de gaz à effet de serre. Dans ce chapitre, on a cité les différentes énergies renouvelables et leurs principes de fonctionnement, on s'est intéressé plus exactement aux énergies qui viennent de la mer et les différents systèmes qui sont réalisés, du point de vue constitution, avantages et inconvénients.

Le chapitre prochain, sera consacré à la présentation des différentes machines linéaires qui sont utilisées. On étudiera plus exactement la génératrice linéaire tubulaire largement utilisée pour la récupération de l'énergie des vagues.

Chapitre II : Etat de l'art sur les machines électriques linéaires

II.1 Introduction	23
II.2 Caractéristiques spécifiques aux moteurs linéaires et domaines d'applications	24
II.3 Différents types des machines électriques linéaires	25
II.4 Différents types des générateurs linéaires	29
II.5 Notion sur les aimants permanents	32
II.6 Les avantages et les inconvénients de la machine linéaire	34
II.7 Conclusion	35

II.1 Introduction :

Le convertisseur électromécanique a été imaginé sous deux formes dont la première est une machine tournante composée de deux armatures magnétiques cylindriques dont l'une est fixe et l'autre est mobile, la deuxième appelée machine linéaire, et également composée de deux armatures magnétiques, la différence est qu'elles sont planes, séparées par un entrefer dans lequel on peut glisser une bande conductrice.

La machine électrique linéaire offre la possibilité d'effectuer un mouvement de type rectiligne en s'affranchissant d'une quelconque transformation mécanique d'un mouvement rotatif en un mouvement linéaire. Particulièrement dans le domaine de la petite puissance, il devient très intéressant de pouvoir effectuer des déplacements linéaires avec des appareils peu encombrants [15].

Pour des applications de l'énergie renouvelable marine, le concept d'une machine linéaire donne l'occasion de simplifier les mécanismes du système s'il peut être employé comme générateur de vitesse réduite. Les différents types de la machine linéaire sont :

- Machine Linéaire à Induction (LIM).
- Machine Linéaire Pas à Pas à Reluctance variable (MLPPRV).
- Machine Linéaire Tubulaire (TLM).

Le moteur linéaire diffère du moteur rotatif par les points fondamentaux suivants :

- Circuit magnétique (inducteur) ouvert aux deux extrémités, ce qui nous donne en outre la possibilité de disposer d'un nombre pair ou impair de pôles.
- Induit étant constitué, d'une masse conductrice, est généralement homogène et isotrope.
- Entrefer important dans la machine linéaire.
- Les machines linéaires sont essentiellement caractérisées par une faible réactance de magnétisation, une faible inertie mécanique, une excellente capacité thermique et une simplicité de réalisation [15].

II.2 Caractéristiques spécifiques des machines électriques linéaires et domaines d'applications

Une machines linéaire génère directement une force de déplacement et un mouvement de translation contrairement aux machines rotatives qui pour y arriver nécessitent l'utilisation d'organes spécifiques de transmission afin d'assurer la conversion du mouvement rotatif en linéaire. Toutefois, ces machines linéaires, présentent des spécificités, dues à la disposition de leurs parties mobiles par rapport à leurs parties fixes, notamment des systèmes de guidage particuliers, entraînement de nouvelles contraintes au niveau de l'entrefer magnétique. De plus, de part leur structure géométrique, les machines linéaires présentent des effets d'extrémités. Ces différences technologiques par rapport aux machines rotatives doivent être prises en compte au moment de la conception et de la réalisation pratique [15].

Les machines linéaires ont un prix initial élevé, essentiellement lié aux coûts des matériaux magnétiques. En effet, contrairement aux machines rotatives, la partie active d'une machine linéaire ne concerne à chaque instant qu'une zone réduite de la machine entière. En d'autres termes, si la machine linéaire peut se déplacer sur 3 mètres de longueur, la partie fixe doit être bobinée ou équipée d'aimants sur les 3 mètres, alors que 20cm peuvent suffire pour la partie mobile. Cela implique un coût plus élevé des matériaux pour les machines linéaires que pour les machines rotatives [19].

Les machines linéaires peuvent être utilisées dans les applications suivantes [18]:

- Remplacement des vérins hydrauliques par des moteurs linéaires.
- Quelques application à très grande vitesse, comme les pompes et les compresseurs, les ventilateurs, de grandes puissances, les machines outils, et les actionneurs.
- Application domestique comme, les aspirateurs, lave-linge, fermetures de rideaux, et les réfrigérateurs.
- Transport comme le tramway, traction routière, bicyclette à assistance électrique.
- Les moteurs d'ascenseurs qui sont situés en haut de cabine où l'ascenseur est tiré par un système de câbles et l'utilisation sur les porte-avions ainsi que les portes coulissantes.

II.3 Différents types des machines électriques linéaires

II.3.1 Moteur linéaire à induction (LIM)

Son principe de fonctionnement est que les enroulements polyphasés de l'inducteur créent un champ magnétique glissant qui traverse l'entrefer, et engendre dans l'induit des forces électromotrices. Le déplacement du champ glissant et de la partie active de l'induit s'effectuant suivant l'axe longitudinal. La composante principale de l'induction magnétique B est dirigée suivant l'axe transversal. Un exemple simple d'une telle machine est donné par la figure (II.1) [16].

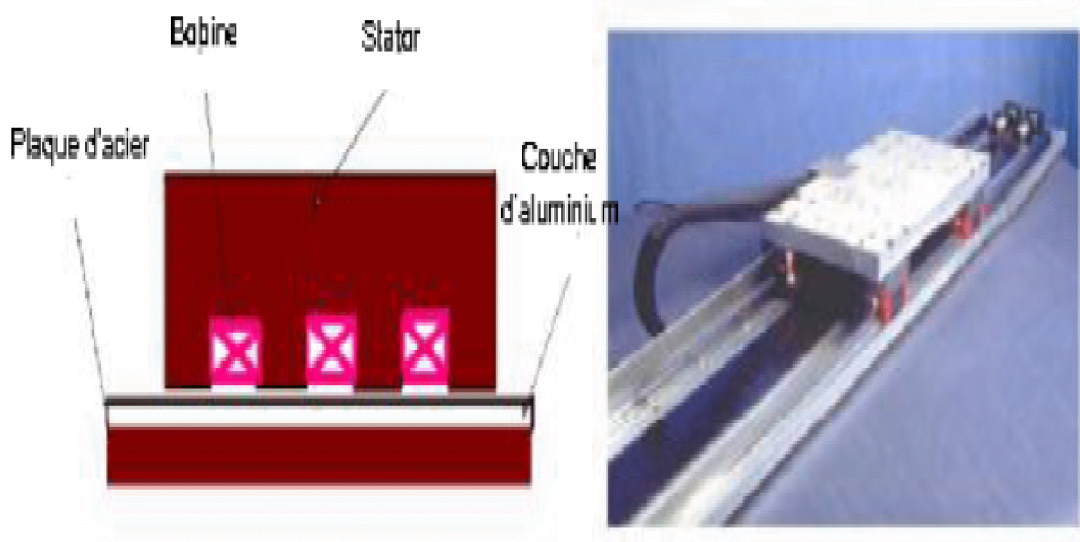


Figure (II.1) : Moteur linéaire à simple induction.

Il existe des moteurs linéaires à aimants permanents ou l'enroulement inducteur conventionnel est remplacé par des aimants permanents à grande énergie. Ce type de moteur est plus employé actuellement, là où les enroulements à fortes poussées sont nécessaires. Sa structure est basée sur le développement à plat d'une machine rotative. Le moteur linéaire à induction est utilisé comme un convertisseur d'énergie électrique en énergie mécanique, il se compose de deux inducteurs plans, comportant des enroulements d'excitations polyphasés et d'un induit constitué par une bande métallique solide (cuivre, aluminium) [16].

II.3.2 Moteur Linéaire Pas à Pas (MLPP)

Tout comme pour les versions rotatives, les moteurs pas à pas linéaires se composent d'un stator portant les bobinages et d'une partie mobile se déplaçant cette fois-ci 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 encore la partie mobile est munie d'aimants permanents et dans ce cas la structure est dite polarisée ou active.

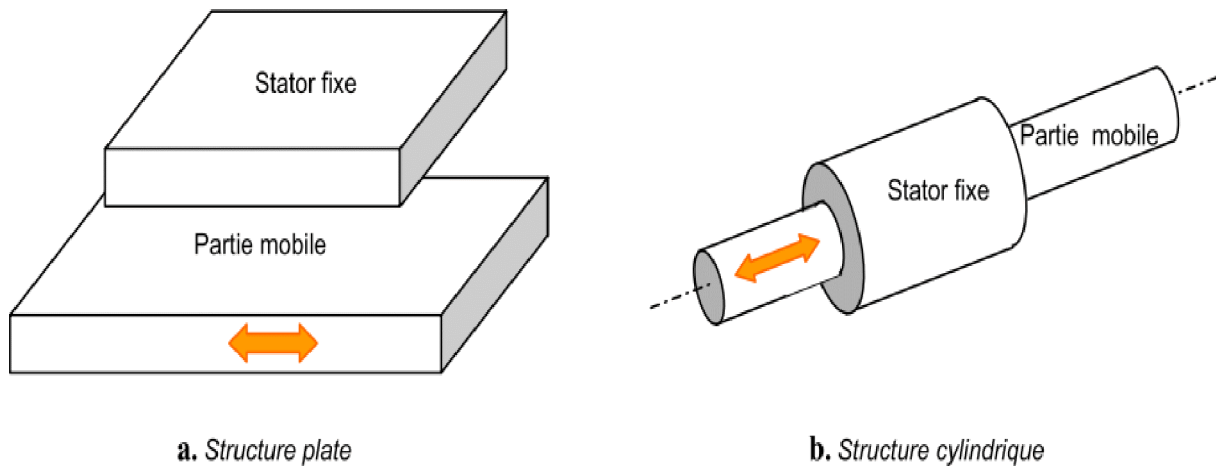


Figure (II.2) : Moteur Linéaire Pas à Pas.

II.3.3 Moteur Linéaire Pas à Pas à Reluctance Variable (MLPP-RV)

Ce type de moteur est caractérisé par une structure dentée aux niveaux du stator et de la partie mobile figure (II.3). Le circuit magnétique est également assemblé à partir de tôles magnétique de forte perméabilité. Toutefois, les machines destinées au positionnement ou à une translation lente, peuvent être réalisées avec des pièces massives. Les enroulements du circuit électrique sont généralement concentrés autour des plots du stator et donc faciles à réaliser [15].

L'alimentation d'une bobine ou d'un groupe de bobines associées à un moteur pas à pas conduit le rotor à une position d'équilibre déterminée. Pour assurer le déplacement d'un pas supplémentaires, il est nécessaire d'alimenter une bobine ou un groupe de bobines différentes.

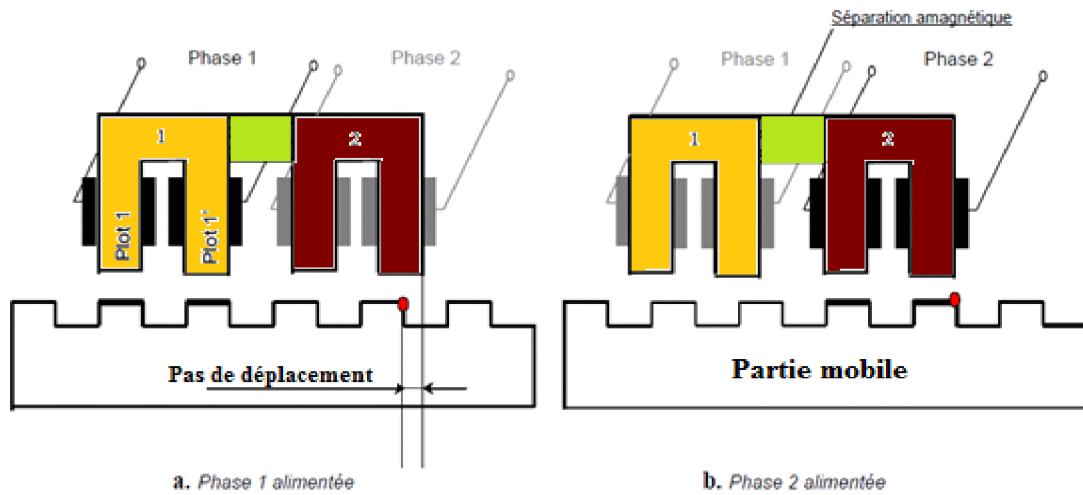


Figure (II.3) : Moteur linéaire Pas à Pas reluctance variable

II.3.4 Moteur pas à pas linéaire polarisés

a- Les moteurs hybrides

Le mouvement des moteurs hybrides résulte de la superposition de la force développée par l'effet relucant des dents et de la force créée par l'aimant [17]. La contribution des amplitudes et des périodes géométriques de ces forces permet de réaliser des caractéristiques statiques très diversifiées. En effet, l'aimant, placé dans la structure hybride, assure une certaine distribution des lignes de champ. La figure(II.4) suivante représente un moteur hybride.

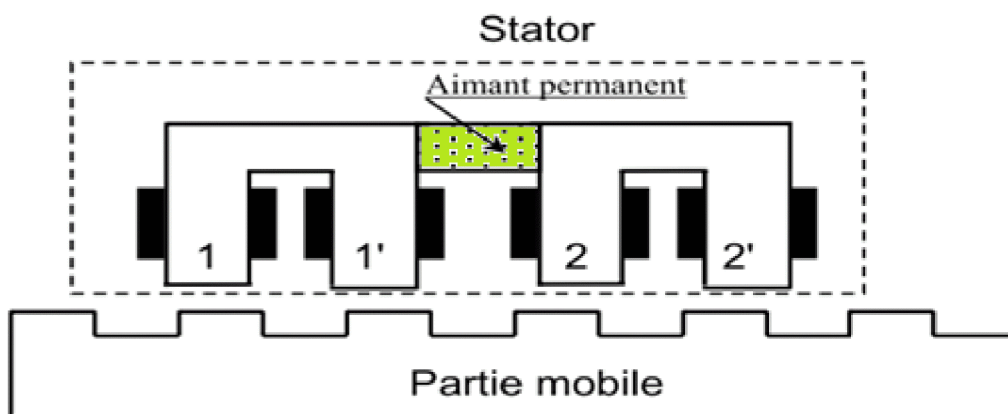


Figure (II.4) : Moteur linéaire Pas à Pas Hybride biphasé [17].

b- Les machines Linéaires à aimants permanents

Ce sont des machines dont la partie mobile est généralement lisse et formée d'une succession d'aimants permanents montés en surface [17]. Le principe de fonctionnement du moteur linéaire à aimant permanent est assuré par l'action d'un champ électromagnétique de l'inducteur sur l'induit composé d'aimants permanents. Les enroulements sont bobinés sur les dents régulièrement réparties dans l'inducteur. Généralement, les aimants utilisés dans les moteurs linéaires synchrones à aimants permanents sont du type Néodyme-FerBore. Les moteurs linéaires à aimants permanents sont souvent alimentés en bipolaire ainsi les enroulements, sont mis en série pour former deux phases décalées de l'angle $\pi/2$. L'alimentation des deux phases par des courants positifs et négatifs provoque un mouvement linéaire appliqué sur l'induit comme le montre la figure(II.5).

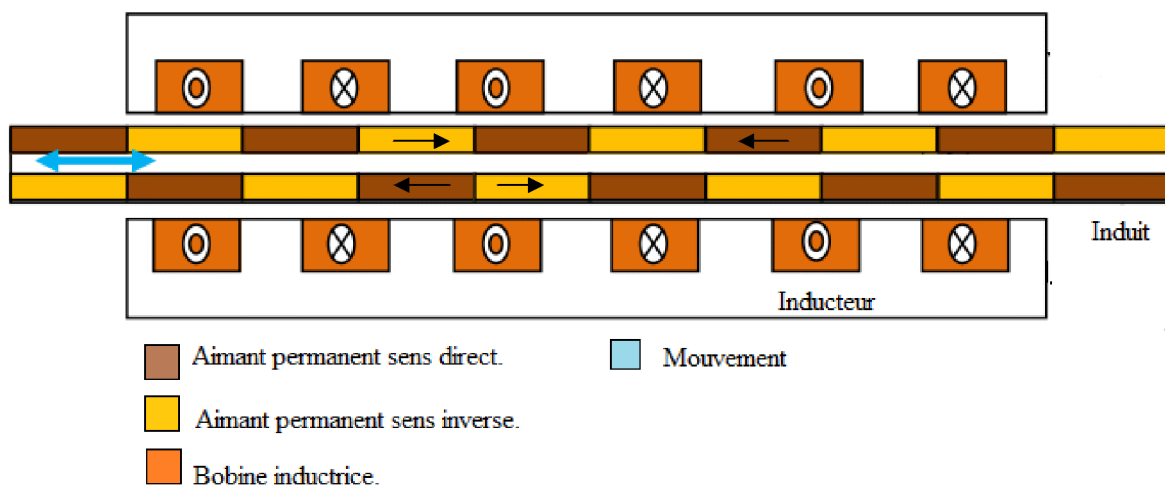


Figure (II.5) : Moteur linéaire à aimant permanent.

II.3.5 Moteur Linéaire Tubulaire Asynchrone triphasé

On peut donner aux moteurs linéaires à induction une forme tubulaire, dans laquelle l'induit et l'inducteur sont cylindriques, et le champ glissant est dirigé le long de l'axe. Ces moteurs sont alors appelés à flux axial [15]. Une façon de créer le champ glissant axial consiste à faire circuler des courants triphasés dans des bobines disposées comme le montre la figure(II.6).

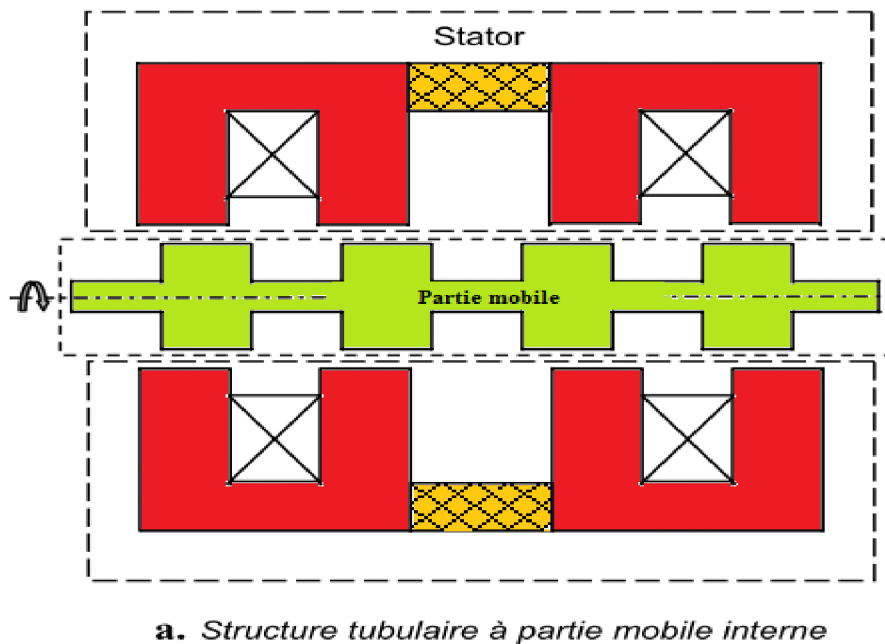


Figure (II.6): Moteur Linéaire Tubulaire.

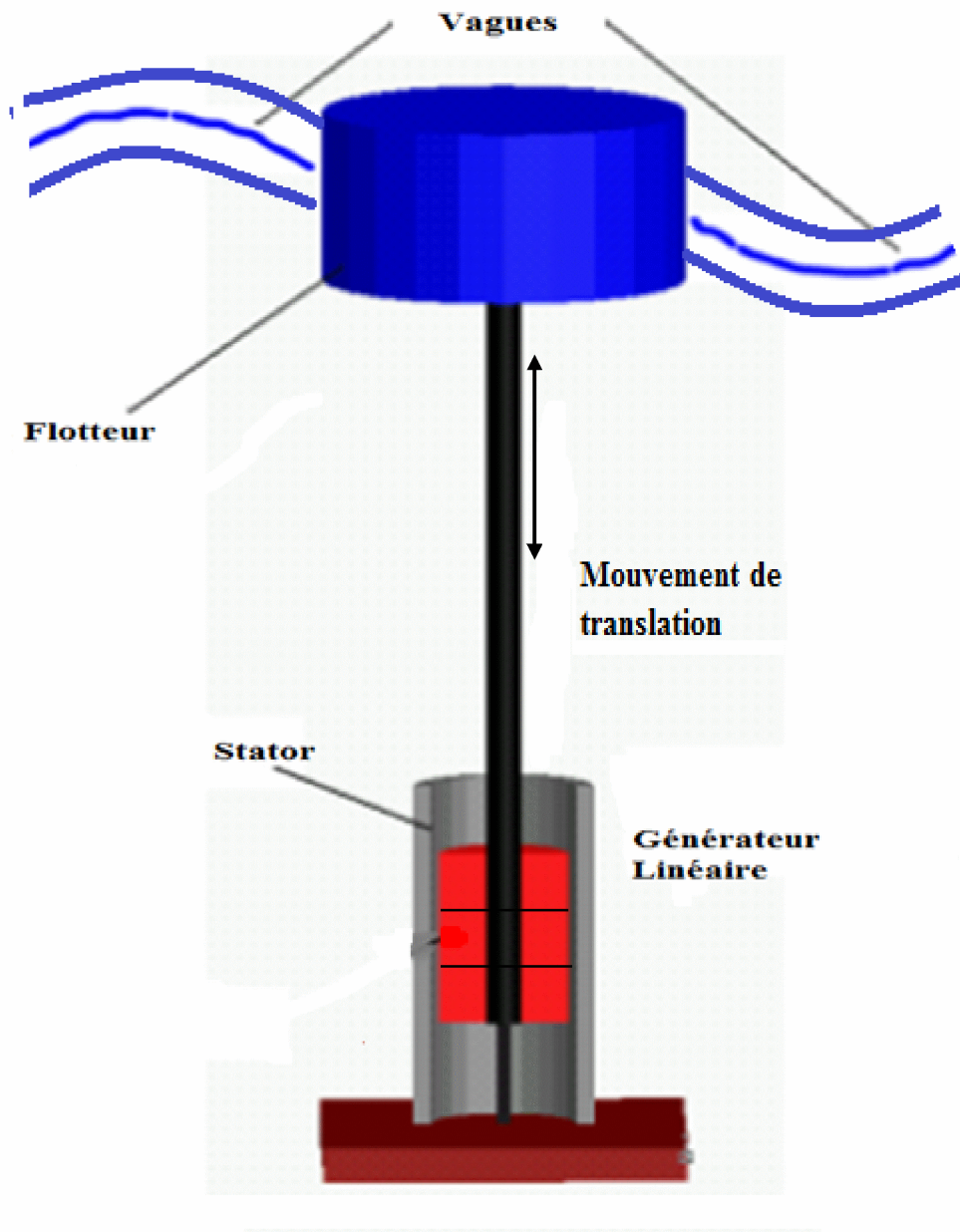
Le Serov Tube de Colley Control, est le premier moteur linéaire triphasé, conçu comme un actionneur. Ayant la vitesse et la robustesse d'un vérin pneumatique, la souplesse d'une vis à billes et la fiabilité intrinsèque, propre aux moteurs linéaires à entraînement direct, le Serov Tube est un actionneur bidirectionnel puissant et bon marché. Il est particulièrement adapté pour les applications d'empilage, de découpage, de traitement de surface, de remplissage et de toute autre manipulation intéressant particulièrement l'industrie de l'agro-alimentaire et de l'emballage.

II.4 Différents types des générateurs linéaires

Les générateurs linéaires sont utilisés de nos jours dans le domaine de la Conversion d'Energie des Vagues de Mer (CEVM). Il se compose de deux parties, une partie flottante supérieure mobile et l'autre partie est fixée au fond de la mer. L'Archimède Wave Swimming (AWS) est une chambre remplie par air, qui est cylindrique dans la forme, figure(II.7). Quand il y a une vague, la quantité de pression qui est due à la hauteur d'eau fait descendre la pièce supérieure de vagabond. Quand la pression est faible et l'air a rempli la chambre tend à pousser la partie supérieure dans sa position agissant en tant que ressort.

Parmi les types des générateurs linéaires on peut faire allusion à :

- Générateur linéaire tubulaire à aimants permanent.
- Générateur linéaire plane à aimants permanent.



Figure(II.7) : Diagramme d'un convertisseur générique d'énergie de vague.

II.4.1 La Génératrice linéaire tubulaire

Le générateur représenté sur la figure (II.8) est l'un des quelques types de générateurs linéaires tubulaires à aimant permanent. Le principe de fonctionnement est identique que celui de l'Archimède Wave Swimming (AWS). Le translateur agit en tant que rotor qui se déplace linéairement tandis que le stator est fixe. Des aimants permanents sont fixés au rotor tandis que le stator porte les enroulements. En raison du mouvement de vague que le rotor se déplace en haut et en bas linéairement.

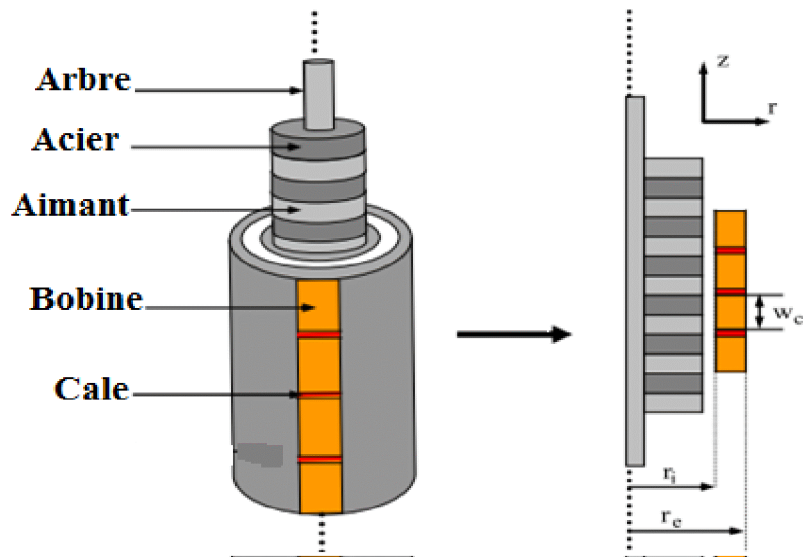
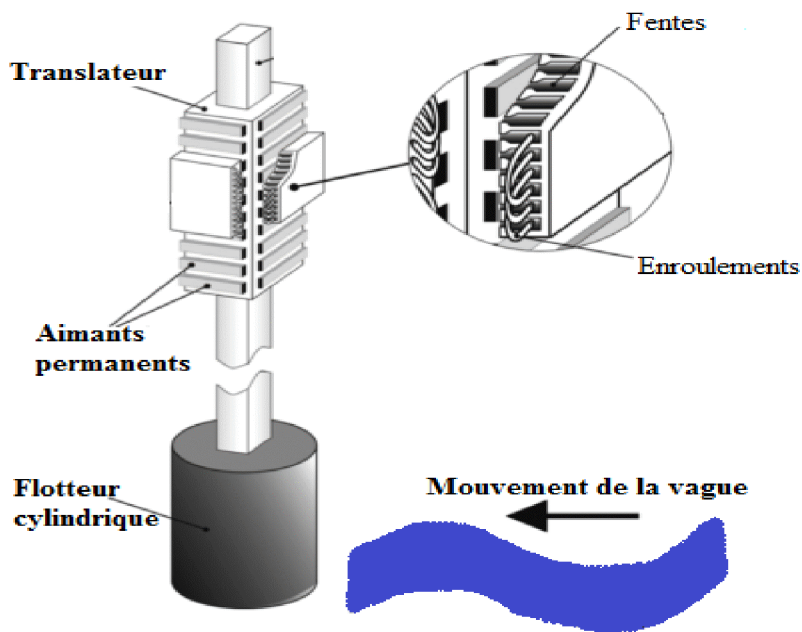


Figure (II.8) : Génératrice linéaire tubulaire [21].

II.4.2 La Génératrice linéaire plane

C'est un type plat du générateur linéaire à double aimant permanent, son principe de fonctionnement est identique à celui de la génératrice linéaire tubulaire. Un type plan a des avantages par rapport à cette dernière du point de vue efficacité, puissance, le courant et la tension sont augmentés. Pour cela il peut être un concept d'Archimède Wave Swimming (AWS) pour la génération de l'électricité de l'énergie des vagues.



Figure(II.9) : Générateur linéaire plan.

Dans cette version de conception, le primaire a l'enroulement triphasé placé dans les fentes. Une partie secondaire qui se compose du plan ferromagnétique et des aimants permanents collée sur sa surface comme représenté sur la figure (II.9).

Ils ont basé leur conception selon le principe simple que le courant électrique sera induit dans un enroulement s'il est déplacé relativement à un champ magnétique. Pendant qu'une vague traverse le dispositif, le flotteur se lève, qui change alternativement la position des enroulements en ce qui concerne un aimant permanent.

II.5 Notion sur les aimants permanents

Un aimant permanent est un matériau qui garde sa magnétisation en l'absence d'excitation. Depuis leur découverte, ils n'ont cessé de connaître des développements dans leurs performances, leur utilisation et leur fonctionnement. Pour caractériser ces aimants on utilise la courbe d'hystérésis [20].

II.5.1 Performances magnétiques des aimants

Les performances magnétiques des aimants permanents sont déterminées à partir de leur courbe d'aimantation $M = f(H)$ ou en induction $B = f(H)$, H représentant le champ magnétique effectif dans l'aimant (figure(II.10)). Ces performances sont particulièrement caractérisées sur le deuxième quadrant du cycle, qui correspond à la courbe de désaimantation. Les grandeurs caractéristiques sont:

- L'induction rémanente : B_r [T]
- Le champ coercitif H_c [A/m]
- Le produit d'énergie volumique : BH dont on tire $(BH)_{max}$ [J/m^3]

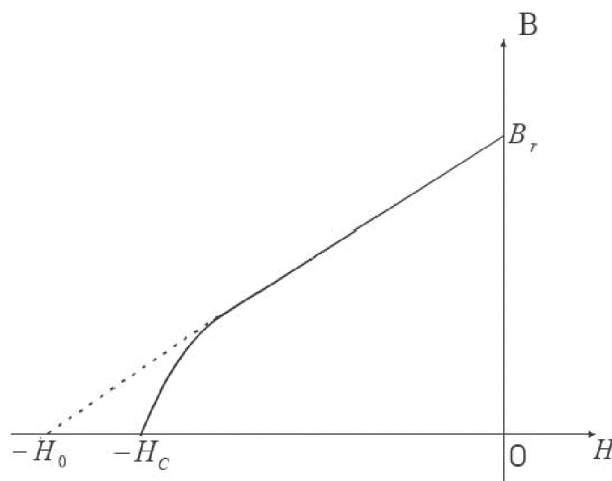


Figure (II.10) : La Courbe de désaimantation.

Le tableau(II.1) présente les valeurs des principales grandeurs magnétiques pour les quatre familles d'aimants. Elles comportent, pour certaines grandeurs, des domaines de variations qui caractérisent les différentes nuances disponibles chez les fabricants [21].

Familles	Température de Curie (°C)	Température maximale d'utilisation (°C)	$(BH)_{max}$ (KJ/m ³)	H_{cj} (KA /m)	Br (T)
ALNICO	740 à 860	450 à 550	35.8 à 43.8	64 à 103	1.1 à 1.3
Ferrites	450 à 460	250	25.5 à 40.5	200 à 400	0.38 à 0.46
Sm-Co (1-5)	700 à 750	250	135.3 à 151.2	960 à 1800	0.82 à 0.87
Sm-Co(2-17)	800 à 850	450 à 550	159.1 à 254.6	490 à 790	0.92 à 1.16
Nd-Fe-B	310 à 330	80 à 180	199 à 310.3	880 à 1990	1 à 1.3

Tableau (II.1) : Valeurs numériques des principales grandeurs magnétiques des grandes familles d'aimants à température ambiante.

Sur la figure(II.11) sont représentées les courbes de désaimantation pour les quatre familles d'aimants.

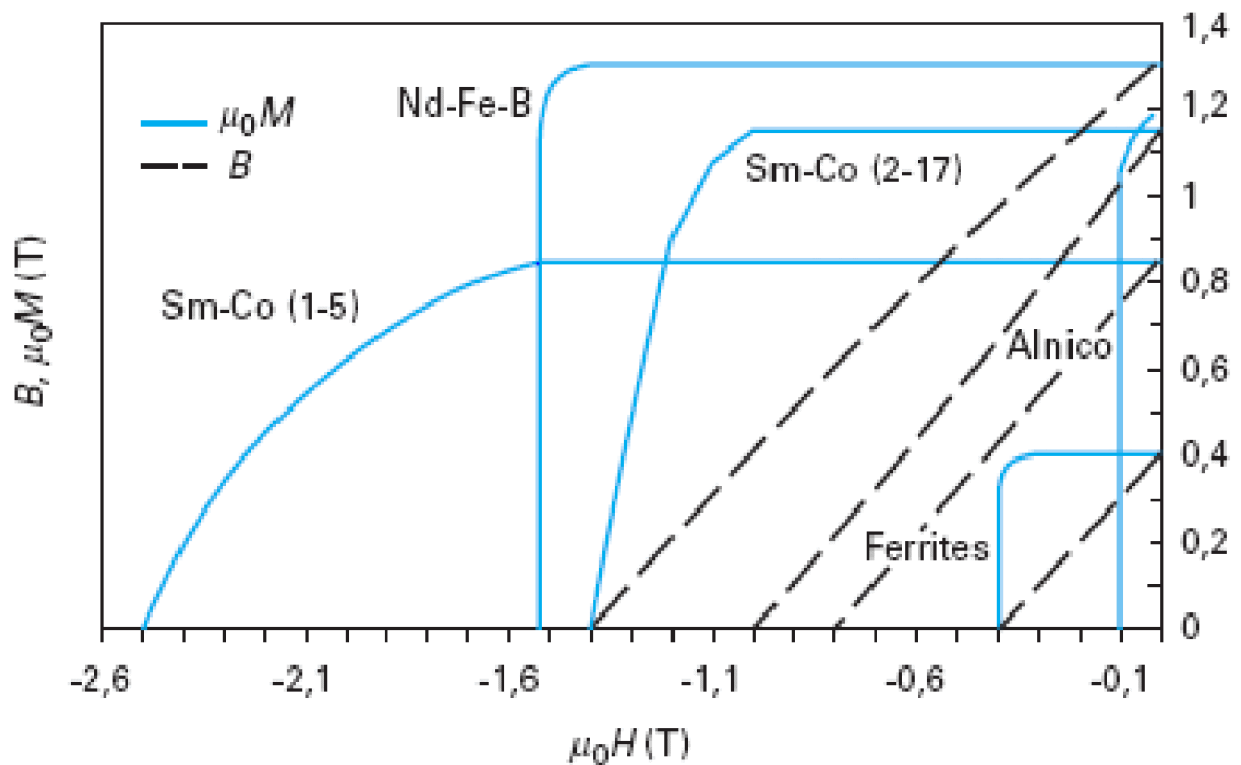


Figure (II.10): Courbes de différents types d'aimants.

II.5.2 Les différents types d'aimants permanent

Les ALNICO sont des alliages contenant des pourcentages d'Aluminium, Nickel et Cobalt. Ils sont caractérisés par des grands inductions rémanentes (B_r) et de faibles champs coercitifs (H_c). C'est pour cette raison qu'ils doivent être magnétisés pendant longtemps avant leurs utilisation car H_c est faible, ils sont durs et rigides physiquement. Contrairement aux ALNICO, les ferrites ont un faible B_r et un grand H_c , leur intérêt réside dans leur faible coût. Les aimants permanents à « Terres rares», il existe deux types :

- A base de Samarium.
- A base de Fer.

Ils sont caractérisés par des grands B_r et H_c , ils sont plus chers et très sensibles à la température élevée [20].

II.6 Les avantages et les inconvénients de la machine linéaire

Les avantages essentiels des moteurs linéaires sont leurs faibles réactances de magnétisation, leur faible inertie mécanique et leur excellente capacité thermique, ce qui augmente leurs champs d'application. C'est dans les domaines de transport, la fabrication, le traitement des matières, les appareillages médicaux, ou leurs propriétés présentent un avantage majeur. Les moteurs linéaires peuvent trouver d'intéressantes applications, d'autant plus qu'ils peuvent se substituer à des dispositifs électromécaniques très complexes donc peut intégrer des systèmes particulier nécessitant peu d'espace. C'est dans les installations de traction électrique, les organes d'asservissement, des chaînes de montage et d'outillages que l'avenir du moteur linéaire paraît le plus prometteur.

Comme la charge est directement reliée au moteur ceci lui procure une dynamique plus vive, il permet d'avoir des accélérations très importante, et une précision de positionnement assez élevée, ce que ne peut procurer un système classique. La machine linéaire est appréciée pour sa fiabilité dans divers situations, et sa durée de vie qui est dix fois plus qu'un système de transmission moteur rotatif. D'autres parts, il ne nécessite que peu de maintenance.

Les machines linéaires possèdent aussi des inconvénients, parmi eux on peut citer, l'entrefer très important du moteur à induction, ce qui exige une énergie considérable pour obtenir une poussé convenable. La conception de l'enroulement doit supporter de grandes densités de courants. La géométrie très particulière de la machine impose une poussé spécifique inférieur à celle de la machine rotatif [18][19].

II.7 Conclusion

Aujourd'hui, les moteurs linéaires sont largement utilisés dans l'industrie, notamment dans les systèmes de production de l'énergie. Dans ce chapitre on a présenté sommairement les machines linéaires existantes, du point de vue de leur de constitutions, leurs principes de fonctionnement, leurs différents types en précisant leurs avantages et leurs inconvénients.

Dans le chapitre qui suit, on va s'intéressé à la mise en équations physique-mathématique s'appuyant sur les équations de Maxwell qui constituent les bases des modèles électromagnétiques. Le but étant l'étude aussi bien en moteur pour les entraînements électromécanique, que pour les générateur pour l'exploitation de l'énergie des vagues.

Chapitre III : Modélisation électromagnétique

III.1 Introduction.....	36
III.2 Les équations de Maxwell (1831-1879).....	36
III.3 Diagramme de Tonti.....	37
III.4 Loi de continuité (la conservation de charge).....	38
III.5 Relation entre les milieux.....	38
III.6 Loi d'ohm	39
III.7 Condition de passage entre deux milieux de propriété différents	40
III.8 Modèle magnétodynamique quasi-stationnaire	41
III.9 Passage des champs aux potentiels	41
III.10 Condition de jauge.....	42
III.11 Les conditions aux limites	42
III.12 Modèle magnétodynamique en potentiel vecteur magnétique A et potentiel scalaire électrique V	43
III.13 Modèle magnétostatique.....	45
III.14 Conclusion	46

III.1 Introduction

L'effet de champ électrique ou magnétique (ou leur combinaison) détermine le fonctionnement des machines électriques (tournantes ou linéaires), des transformateurs, et de l'appareillage de coupures de haute ou basses tensions. La connaissance de ses champs permet dans tous les appareils électromagnétiques d'avoir accès au calcul de ses performances globales et au détail des conditions de son fonctionnement, soit en régime permanent, soit en régime transitoire.

Hormis une étude expérimentale pure, trouver un modèle qui traduit fidèlement un phénomène physique est un préalable à son étude. En ce qui concerne les phénomènes électromagnétiques, James Clark Maxwell les a regroupés, dans quatre équations, aux quelles sont associées les relations dites de milieu et de passage, permettant la modélisation de la majorité des systèmes électromagnétiques.

III.2 Les équations de Maxwell (1831-1879)

Les équations de Maxwell se résument sous forme de quatre équations permettant d'expliquer tous les phénomènes électromagnétiques dans tous types de dispositifs. Ces équations traduisent les interactions entre le champ électrique \vec{E} , et le champ magnétique \vec{H} avec leur sources respective charge électrique, courant électrique (ou aimant permanent) [23] [24].

Le tableau (III.1) montre les équations de Maxwell sous forme intégrales et sous forme différentielles :

Les équations de Maxwell	Formes intégrales	Formes Différentielles
Gauss Maxwell Ampère	$\oiint \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q_{int}$	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$ III.1
Gauss Maxwell magnétique	$\oiint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$ III.2
Maxwell faraday	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ III.3
Maxwell Ampère	$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$	$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ III.4

Tableau (III.1) : les Equations de Maxwell sous forme intégrales et différentiel.

\vec{E} : Champs électrique [V/m].

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

\vec{H} : Champs excitation magnétique [A/m].

\vec{B} : Champ d'induction magnétique[T].

\vec{J}_C : Densité de courant de conduction [A/m^2].

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

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: Densité de courant de déplacement.

I : Courant électrique [A].

Qint : charges électrique[C].

III.3 Diagramme de Tonti

Les équations de Maxwell se présentent en deux systèmes duaux :

- les lois de Faraday et de Conservation de flux d'une part (système magnétique).
- les théorèmes d'Ampère-Maxwell et de Gauss d'autre part (système électrique).

La dualité des deux systèmes peut être mise en évidence à l'aide du diagramme de Tonti [25] (figure III.1).

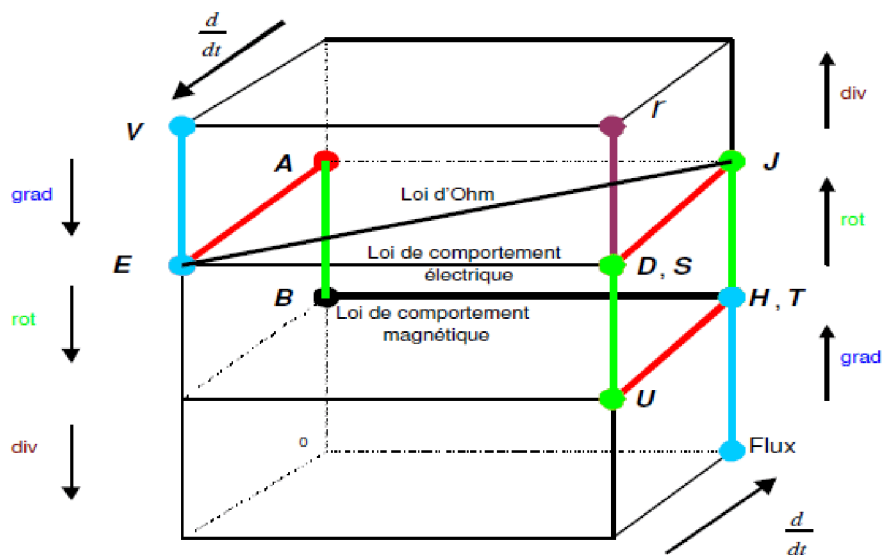


Figure III.1 : Diagramme de Tonti [26].

Les deux niveaux successifs d'une colonne sont liées par les opérateurs de dérivation ($\text{div} : \nabla \cdot (\vec{\cdot})$, $\text{rot } \vec{\nabla} \wedge (\vec{\cdot})$ et $\overrightarrow{\text{grad}}(\cdot)$). Les deux formes du même niveau sont liées par la loi de comportement (transformation de Hodge). Afin de tenir compte de la dérivation temporelle, le diagramme est constitué par deux plans et est représenté en 3 dimensions. Les deux plans sont liés par l'opérateur de la dérivation dans le temps [25].

Tous les problèmes électromagnétiques figurent dans le diagramme de Tonti:

- le plan avant décrit le problème de l'électrostatique.
- le plan arrière représente le problème de la magnétostatique.
- le problème de propagation d'ondes est représenté par l'ensemble des plans avant et arrière.

III.4 Loi de continuité (la conservation de charge)

On appliquant la divergence à l'équation de Maxwell –Ampère on aura :

$$\nabla \cdot (\vec{\nabla} \wedge \vec{H}) = \nabla \cdot \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \vec{D}) = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \tag{III.5}$$

L'équation (III.5) traduit la conservation de l'électricité dans un milieu donné, c'est-à-dire qu'on ne peut pas avoir des charges qui peuvent sortir ou entrer au système.

Et par analogie avec l'équation d'Ampère-Maxwell en régime variable (III.4), on trouve que ces deux équations sont compatibles, raison pour laquelle Maxwell a transformé le théorème d'Ampère en régime variable en ajoutant le terme $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ (le courant de déplacement) [24].

III.5 Relation entre milieux

La résolution des équations de Maxwell ne peut s'effectuer sans les relations constitutives du milieu. Une relation constitutive décrit localement le comportement des grandeurs électromagnétiques dans un matériau donné [27].

- **Relation magnétique**

Il exprime le lien entre le champ magnétique \vec{H} et l'induction magnétique \vec{B} à travers la perméabilité μ [28].

$$\vec{B} = \mu(\|H\|) \cdot \vec{H} \quad \text{III.6}$$

$$\mu(\|H\|) = \mu_0 \mu_r(\|H\|)$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$: La Perméabilité magnétique du vide [H/m].

$\mu_r(\|H\|)$: Perméabilité magnétique relative du milieu considéré.

Pour un milieu formé d'un aimant permanent :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad \text{III.7}$$

\vec{B}_r : Induction rémanente [Tesla].

- **Relation diélectrique**

Il exprime le lien entre le champ électrique \vec{E} et le vecteur déplacement \vec{D} à travers la permittivité électrique ε .

$$\vec{D} = \varepsilon(\|E\|) \cdot \vec{E}$$

$$\varepsilon(\|E\|) = \varepsilon_0 \varepsilon_r(\|E\|) \quad \text{III.8}$$

$\varepsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$: La Permittivité électrique du vide [F/m].

$\varepsilon(\|E\|)$: Permittivité électrique relative du milieu considéré.

III.6 Loi d'ohm

C'est une relation qui exprime le lien entre le champ électrique \vec{E} et la densité de courant de conduction \vec{J}_c à travers la conductivité σ [27].

La loi d'ohm généralisée s'écrit sous la forme suivante :

$$\vec{J}_c = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{v} \wedge \vec{B}) \quad \text{III.9}$$

avec:

σ : Conductivité électrique [Ω/m].

\vec{J}_S : Densité de courant de source [A/m^2].

\vec{E} : Champ électrique de source [V/m].

\vec{E}' : Champ électromoteur [V/m].

\vec{v} : vitesse de déplacement du milieu [m/s].

\vec{B} : Induction magnétique [tesla].

III.7 Condition de passage entre deux milieux de propriété différents

Pour résoudre les équations de Maxwell dans un domaine entier, contenant des sous-domaines avec différentes propriétés des matériaux, il est nécessaire de considérer les conditions de passage (ou d'interface) qui s'énoncent comme suit:

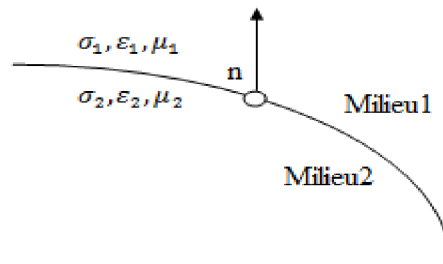


Figure III.2 : Surface S entre deux milieux continus.

La discontinuée de la composante tangentielle du champ électrique :

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \wedge \vec{n} = 0 \quad \text{III.10.a}$$

La discontinuée de la composante normale de l'induction magnétique :

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad \text{III.10.b}$$

La discontinuée de la composante tangentielle du champ magnétique due aux Courants surfaciques s'ils existent \vec{K}_S :

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \wedge \vec{n} = \vec{K}_S \quad \text{III.10.c}$$

La discontinuée de la composante normale de l'induction électrique due aux charges surfaciques ρ_s :

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \rho_s \quad \text{III.10.d}$$

III.8 Modèle magnétodynamique quasi-stationnaire

Le régime quasi-stationnaire consiste à considérer des variations lentes dans le temps, ce qui correspond à des courants de déplacements négligeables devant les courants de conduction

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \ll J_c$. De plus dans le domaine de l'électrotechnique les fréquences de travail sont inférieures aux radios fréquences qui sont de l'ordre 10^{12} HZ, Ce qui permet aussi de négliger

Le terme $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ [26].

En considérant les hypothèses simplificatrices précédentes, les équations de maxwell s'écrivent sous la forme suivante :

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad \text{III.11}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{III.12}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{III.13}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}_c \quad \text{III.14}$$

III.9 Passage des champs aux potentiels

En raison des fortes discontinuités de certaines grandeurs physiques aux interfaces entre les

En raison des fortes discontinuités de certaines grandeurs physiques aux interfaces entre les régions de matériaux différents, la résolution directe des équations de Maxwell est très difficile, voir impossible. De plus les vecteurs ont généralement trois composantes, augmentant par-là le nombre d'inconnues, ce qui entraine un temps de résolution plus important. Pour remédier à ces inconvénients on fait appel aux potentiels vecteur/scalaire électriques ou magnétiques [27].

D'après la troisième équation de Maxwell :

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \exists \vec{A} / \vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A}$$

\vec{A} : Potentiel vecteur électrique.

En régime statique $\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = 0 \quad \exists V$ (potentiel scalaire électrique) tel que :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad \text{III.15}$$

On peut aussi définir deux potentiels combinés tel que :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial(\vec{\nabla} \wedge \vec{A})}{\partial t} = -\vec{\nabla} \wedge \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\vec{E} - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0$$

D'où

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad \text{III.16}$$

Pour les dispositifs alimentés en courants on a :

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad \text{III.17}$$

III.10 Conditions de jauge

Afin d'assurer l'unicité de la solution du potentiels vecteur magnétique et potentiel scalaire électrique, des conditions de jauge doivent être satisfaites, on distingue :

- La condition de jauge de Coulomb, est exprimée par : $\nabla \cdot \vec{A} = 0$
- La condition de jauge de Lorentz, est exprimée par : $\nabla \cdot \vec{A} = \sigma \mu V$

III.11 Les conditions aux limites

Les conditions aux limites sur la frontière spatiale du domaine, peuvent être de type :

- Dirichlet :

$$A|_{\text{Frontière}} = A_s \quad \text{III.18}$$

- Newman:

$$\left. \frac{\partial A}{\partial n} \right|_{\text{Frontière}} = A_n \quad \text{III.19}$$

III.12 Modèles magnétodynamiques en potentiel vecteur magnétique A et potentiel scalaire électrique V

Ce sont des modèles s'appliquant aux dispositifs d'électrotechniques dans lesquels les sources de courants ou de tension varient en fonction du temps [28].

III.12.1 Modèle AV général

A partir des équations (III.7), (III.14) et (III.16) on a :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \vec{\nabla} V = +\vec{J}_S + \vec{\nabla} \wedge \left(\frac{\vec{B}_r}{\mu} \right) \quad \text{III.20}$$

Le terme $\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ représente les courants induits dans les conducteurs massifs et le terme $-\sigma \vec{\nabla} V$ représente le courant de source \vec{J}_S .

L'équation (III.20) présente deux grandeurs inconnues le potentiel vecteur magnétique et le potentiel scalaire électrique. L'équation additionnelle concerne la conservation de la densité de courant :

$$\nabla \cdot \vec{J}_C = \nabla \left[-\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \vec{\nabla} V \right] - \nabla \cdot \vec{J}_S = 0 \quad \text{III.21}$$

On obtient aussi le modèle générale AV formé par les équations III.20 et III.21 auxquelles sont adjointes les conditions d'unicité des potentiels :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \vec{\nabla} V = +\vec{J}_S + \vec{\nabla} \wedge \left(\frac{\vec{B}_r}{\mu} \right) \\ \nabla \left[-\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \vec{\nabla} V \right] - \nabla \cdot \vec{J}_S \end{array} \right. \quad \text{III.22}$$

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \quad \text{Ou} \quad \nabla \cdot \vec{A} = \sigma \mu V \quad \text{III.23}$$

III.12.2 Modèle en A général

Le modèle en potentiel vecteur magnétique général consiste à imposer la condition de Jauge de Coulomb ($\nabla \cdot \vec{A} = 0$).

L'équation (III.22) devient :

$$\sigma \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \vec{A} + \nabla \cdot (\sigma \vec{\nabla} V) = \nabla \cdot \vec{J}_S \quad \text{III.24}$$

Comme la Gauge de coulomb est satisfait, alors :

Alors

$$\vec{J}_S = \sigma \vec{\nabla} V \quad \text{III.25}$$

On obtient finalement le modèle en A générale 2D ou 3D suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_S + \vec{\nabla} \wedge \left(\frac{\vec{B}_r}{\mu} \right) \\ \nabla \cdot \vec{A} = 0 \end{array} \right. \quad \text{III.26}$$

En coordonnées cartésiennes bidimensionnelles dans le plan (x, y) :

$$-\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z^2}{\partial x^2} - \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z^2}{\partial y^2} + \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} = J_z + \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial B_{ry}}{\partial x} - \frac{\partial B_{rx}}{\partial y} \right) \quad \text{III.27}$$

$$\vec{A} = (0, 0, A_z), \quad \vec{J}_S = (0, 0, J_z) \quad \text{et} \quad \vec{B}_r = (B_{rx}, B_{ry}, 0). \quad \text{III.28}$$

En coordonnées cylindriques bidimensionnelles dans le plan (r, z):

$$-\frac{1}{\mu r} \frac{\partial r A_\varphi^2}{\partial r^2} - \frac{1}{\mu r} \frac{\partial r A_\varphi^2}{\partial z^2} + \frac{\sigma}{r} \frac{\partial r A_\varphi}{\partial t} = J_{S\varphi} + \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial B_{rz}}{\partial r} - \frac{\partial B_{rr}}{\partial z} \right) \quad \text{III.29}$$

$$\vec{A} = (0, A_\varphi, 0), \quad \vec{J} = (0, J_\varphi, 0) \quad \vec{B}_r = (B_r, 0, B_z) \quad \text{III.30}$$

En 3D Le potentiel vecteur magnétique \vec{A} nécessite la définition d'une condition de Jauge - de Lorentz afin d'assurer son unicité.

III.13 Modèle magnétostatique

Elle consiste à étudier des phénomènes magnétiques en régime stationnaire. Le champ magnétique est alors invariants dans le temps et n'est du qu'à des courants stationnaires imposés J_S ou à des aimants permanents (induction rémanente B_r), les équations à considérer sont les équations de Maxwell ou les dérivées temporelles sont annulées [29].

III.13.1 Modèle magnétostatique vectoriel

On utilise cette formulation pour modéliser un objet parcouru par un courant non nul.

L'équation (III.26) devient :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{\vec{\nabla} \wedge \vec{A}}{\mu} \right) = \vec{J}_S + \frac{\vec{\nabla} \wedge \vec{B}_r}{\mu} \quad \text{III.31}$$

\vec{J}_S : Le terme de source.

$\frac{\vec{\nabla} \wedge \vec{B}_r}{\mu}$: Terme du aux aimants permanents.

L'inconvénient de la magnétostatique vectorielle est de traiter des grandeurs vectorielles à trois composantes inconnues au lieu d'une inconnue scalaire [28].

III.13.2 Modèle magnétostatique scalaire

Dans ce cas on suppose que les courants électriques sont nulles (régions non conductrices), et que le champ magnétique ne dépend pas du temps.

Dans ce cas le champ dérive d'un potentiel magnétique scalaire (φ) :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = 0 \quad \ni \text{Un potentiel scalaire magnétique } \varphi(x, y, z) \text{ tel que : } \vec{H} = -\vec{\nabla} \varphi$$

$$\text{On a: } \nabla \cdot \vec{B} = \nabla \cdot (\mu \vec{H} + \vec{B}_r) = 0 \quad \text{III.32}$$

D'où:

$$\nabla \cdot (\mu (\vec{\nabla} \varphi)) = \nabla \cdot \vec{B}_r \quad \text{Equation magnétostatique scalaire.} \quad \text{III.33}$$

L'utilisation du potentiel scalaire assure la continuité de la composante tangentielle du champ magnétique \vec{H} aux interfaces, mais il convient d'assurer la continuité de la composante

normale du vecteur d'induction magnétique B à une interface entre deux régions de perméabilité μ_1 et μ_2 [22]. L'inconvénient de cette formulation est le fait qu'elle est applicable uniquement dans les régions non conductrices (l'air) [26].

III.14 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les bases mathématiques des équations électromagnétiques utilisées pour la modélisation d'un problème électrotechnique à travers le rappel des équations de Maxwell. Ainsi les différentes formulations magnétostatiques et magnétodynamiques en potentiels vecteur magnétique et potentiel scalaire électrique sont présentés. Ces formulations conduisent à des équations aux dérivées partielles auxquelles il faut associer à des conditions aux limites, conditions d'interfaces et conditions d'unicité (Jauge).

Dans le chapitre qui suit, nous présenterons les principales méthodes de résolutions d'équations aux dérivées partielles caractérisant les modèles magnétostatique et magnétodynamique.

Chapitre IV : Méthode de résolutions des modèles électromagnétiques

IV.1 Introduction	47
IV.2 Méthodes analytiques	47
IV.3 Méthodes Semi-analytiques.....	48
IV.4 Méthodes numériques	50
IV.5 Méthode des différences finies (MDF)	50
IV.6 Principe de la Méthode des Eléments Finis (MEF)	51
IV.7 Présentation de la méthode des éléments finis(MEF)	52
IV.8 Conclusion	56

IV.1 Introduction

Les phénomènes qui décrivent le comportement des dispositifs électromagnétiques sont représentés par des Equations aux Dérivées Partielles(EDP). Ces phénomènes se retrouvent dans des régions de géométries très variées. En générale la résolution de ces équations conduite en utilisant à des méthodes analytiques, semi-analytiques ou numériques. Lorsqu'il s'agit de résoudre un problème de type EDP, en premier, nous pensons aux approches mathématiques analytiques, dès que la complexité de la géométrie s'accroît et que certains matériaux possèdent des caractéristiques non linéaires, La résolution de tels problèmes nécessite de recourir à des approches numérique [27].

IV.2 Méthodes analytiques

Ce sont les premières méthodes utilisées, restreint à des géométries simples dans une approche unidimensionnelle, ou quelque fois dans des problèmes bidimensionnels. Elles permettent d'obtenir une solution mathématique exacte du problème. Les méthodes analytiques présentent Une difficulté liée à la complexité de traitement des géométries complexes. Elles s'appliquent seulement pour les milieux à propriétés linéaires isotropes et chaque équation aux drivées partielles nécessite un traitement spécial. La méthode analytique la plus puissante et la plus couramment utilisée pour la résolution des EDP est la Méthode de Séparation des Variables. Le principe de cette méthode consiste à mettre l'inconnue sous forme d'un produit des fonctions, dont chacune ne dépend que d'une seule variable [27] [18].

Soit en coordonnées cartésiennes, l'inconnue $A_z(x, y)$, qui est écrit comme suit :

$$A_z(x, y) = A_z(x).A_z(y) \quad \text{IV.1}$$

$A_z(x, y)$: Solution de l'équation aux dérivées partielles.

$A_z(x)$: Est une fonction ne dépend que de x.

$A_z(y)$: Est une fonction ne dépend que de y.

Après avoir remplacé(VI.1) dans l'EDP, on obtient autant d'équations que de composantes inconnus totalement indépendantes les unes des autres.

IV.3 Méthodes Semi-analytiques

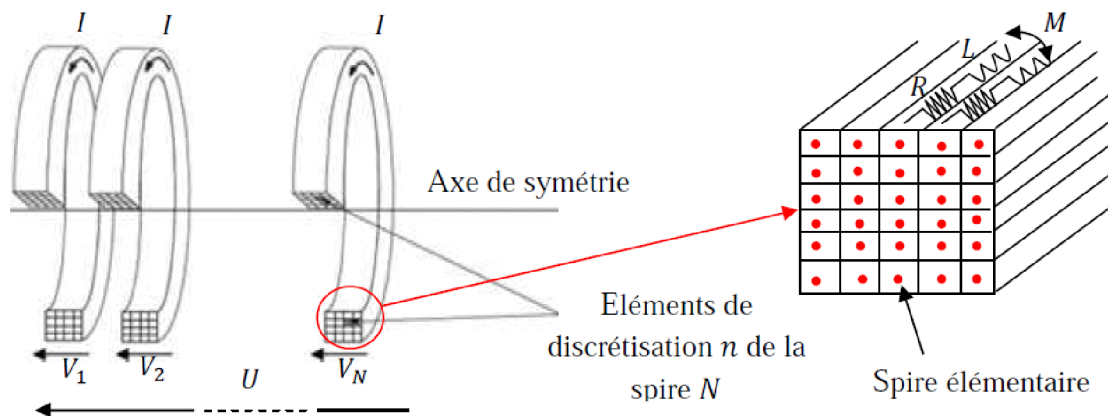
Les méthodes semi-analytiques sont basées d'une part sur une discrétisation géométrique en petit éléments, sur lesquels on applique ensuite des formules analytiques (Biot-savart ou des formules intégrales des équations de Maxwell), parmi ces méthodes on peut citer :

- La méthode des circuits couplés(MCC)
- La méthode PEEC (Partiel Electric Equivalent Circuits).

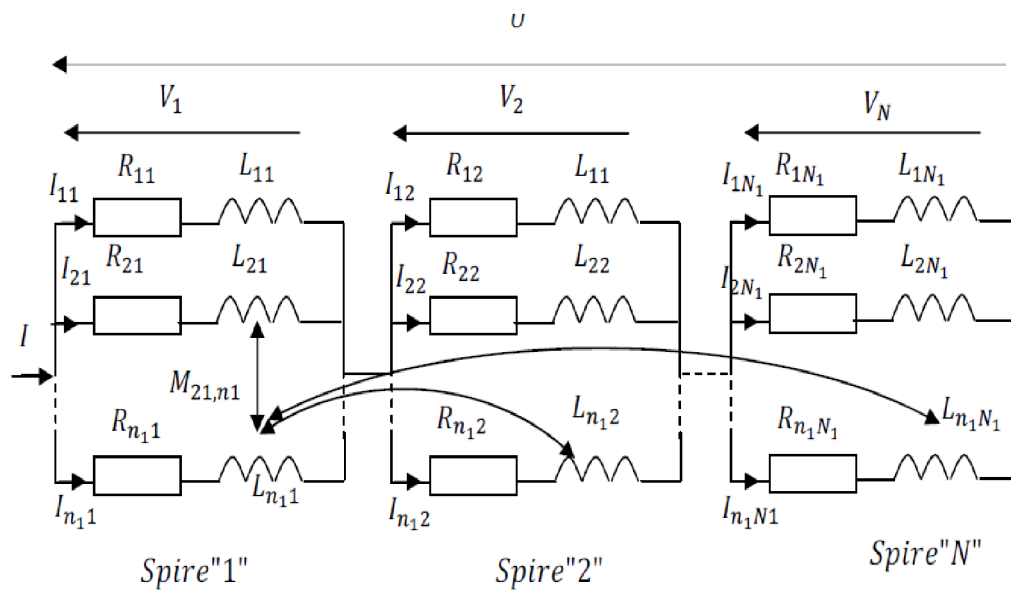
IV.3.1 Méthode des circuits couplés

La méthode des circuits couplés utilisée en chauffage par induction et en contrôle non destructif(CND) s'applique qu'aux milieux conducteurs de propriété linéaires avec des géométries simples. Elle consiste à subdiviser l'inducteur et la charge en éléments de circuits élémentaires circulaires ou coaxiaux. Chaque élément est représenté par sa résistance électrique et son inductance, ces éléments forment entre eux un système de circuit mutuellement couplés.

Toutes les N spires principales de l'inducteur sont en séries et chacune de ces spires est constituée de n spires élémentaires en parallèles. La charge est constituée de m spires élémentaires toutes en court-circuit et disposées en parallèle. La discrétisation par la méthode des circuits couplée est représenté dans la figure (IV.1) [32].



a : découpage d'un inducteur en spire élémentaires.



b : Circuit électrique équivalent de la figure (IV.1) a

Figure(IV.1) : Schémas relatifs à la méthode des circuits couplés [36].

En utilisant les équations de Kirchhoff, on peut former les différentes équations électriques pour chaque spire élémentaire, auxquelles il faut ajouter les équations de conservations de la tension (loi de maille) et du courant (loi de Nœuds).

Dans le cas des phénomènes électromagnétiques sinusoïdaux, le système d'équation obtenu est linéaire et à coefficient complexe, il est de la forme suivant :

$$[Z]. [I] = [V] \tag{IV.2}$$

Les éléments de la matrice [Z] sont :

$$Z_{ii} = R_{ii} + j. \omega. L_{ii} \tag{IV.3}$$

R_{ii} : Résistance de la $i^{\text{ème}}$ spire.

L_{ii} : Inductance propre de la $i^{\text{ème}}$ spire.

[I] : Vecteur des courants dans les spires filiformes.

[V] : Vecteur des tensions dans les spires filiformes.

IV.3.2 Méthode de PEEC (Partiel Electric Equivalent Circuits)

Cette méthode est une généralisation de la méthode des circuits couplés (MCC), elle permet d'écrire les phénomènes EM cartésiens ou cylindrique sous forme des circuits équivalents (RLM-C) aussi bien en coordonnées 2D que 3D, elle est développée par RUELHI en 1974, dans le but de calculer le couplage inductif dans les circuits intégrés, afin d'assurer la nécessité de la montée en fréquence.

IV.4 Méthodes numériques

Ce sont des méthodes basées sur la discrétisation du domaine d'étude. Leur utilisation consiste à ramener la résolution des équations aux dérivées partielles, compte tenu des conditions aux limites, à celle d'un système d'équations algébriques dont la solution donne la valeur et la distribution des grandeurs recherchées. Parmi ces méthodes on a :

- ∅ La Méthode des Différences Finies (MDF).
- ∅ La Méthode des Eléments Finis (MEF).

IV.4.1 Méthode des différences finies (MDF)

La méthode des différences finies est basée sur la transformation de l'opérateur différentiel en un opérateur aux différences ou chaque dérivée est approchée par une différence de valeur de l'inconnue à déterminer en un certain nombre de points du domaine de résolution, ainsi que l'EDP est transformée en équation algébrique en chacun des points.

Pour l'approximation on utilise le réseau carré suivant :

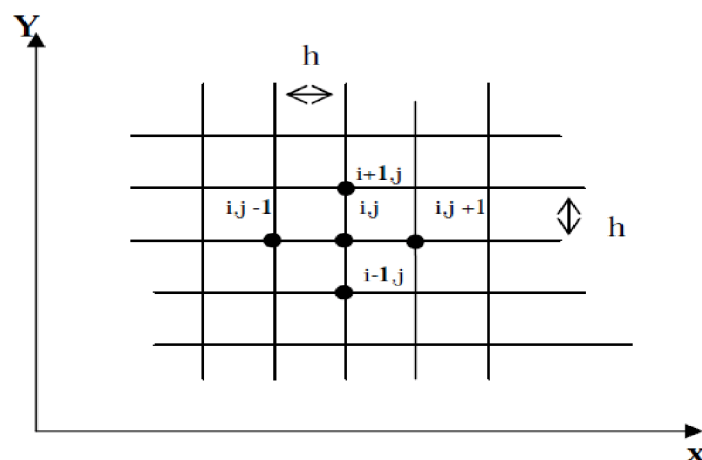


Figure (IV. 2) : Maillage différences finis.

Pour la dérivée d'ordre 1 :

$$\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right) = \frac{A_{i+1,j} + A_{i-1,j}}{\Delta x} \quad \text{IV.4}$$

$$\left(\frac{\partial A}{\partial y}\right) = \frac{A_{i,j+1} + A_{i,j-1}}{\Delta y} \quad \text{IV.5}$$

Pour la dérivée d'ordre 2 :

$$\left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2}\right) = \frac{A_{i+1,j} - 2A_{i,j} + A_{i-1,j}}{\Delta x^2} \quad \text{IV.6}$$

$$\left(\frac{\partial^2 A}{\partial y^2}\right) = \frac{A_{i,j+1} - 2A_{i,j} + A_{i,j-1}}{\Delta y^2} \quad \text{IV.7}$$

Ainsi l'opérateur laplacien peut s'écrire en tous les nœuds peut s'écrire en tous les nœuds comme suit :

$$(\Delta A)_{i,j} = \frac{A_{i+1,j} + A_{i-1,j} + A_{i,j+1} + A_{i,j-1} - 4A_{i,j}}{h^2} \quad \text{IV.8}$$

Cette méthode non applicable aux matériaux non linéaires, s'adapte mal aux objets à géométries complexes à cause de la rigidité du maillage.

IV.4.2 Principe de la Méthode des Éléments Finis (MEF)

La méthode des éléments finis s'applique à la majorité des problèmes rencontrés dans la pratique : problèmes stationnaires ou non stationnaires, linéaires ou non linéaires définis dans un domaine géométriques quelconque à une, deux ou trois dimensions, en plus elle s'adapte mieux aux milieux hétérogènes. L'avantage majeur de cette méthode par rapport aux autres c'est que, dans cette méthode, chaque élément peut avoir des caractéristiques électriques et géométriques particulières et indépendants des autres éléments. Cette méthode consiste à utiliser une approximation simple des variables inconnues pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques. Les conditions aux limites sont prises en compte.

La méthode des éléments finis fait appelle à trois domaines : aux sciences de l'ingénieur pour décrire les lois physiques (équations aux dérivées partielles), à l'analyse numériques pour résoudre les équations algébriques, et l'outil informatique pour résoudre efficacement les calculs sur l'ordinateur [28]. Les étapes de la méthode des éléments finis sont résumées par la figure (IV.3).

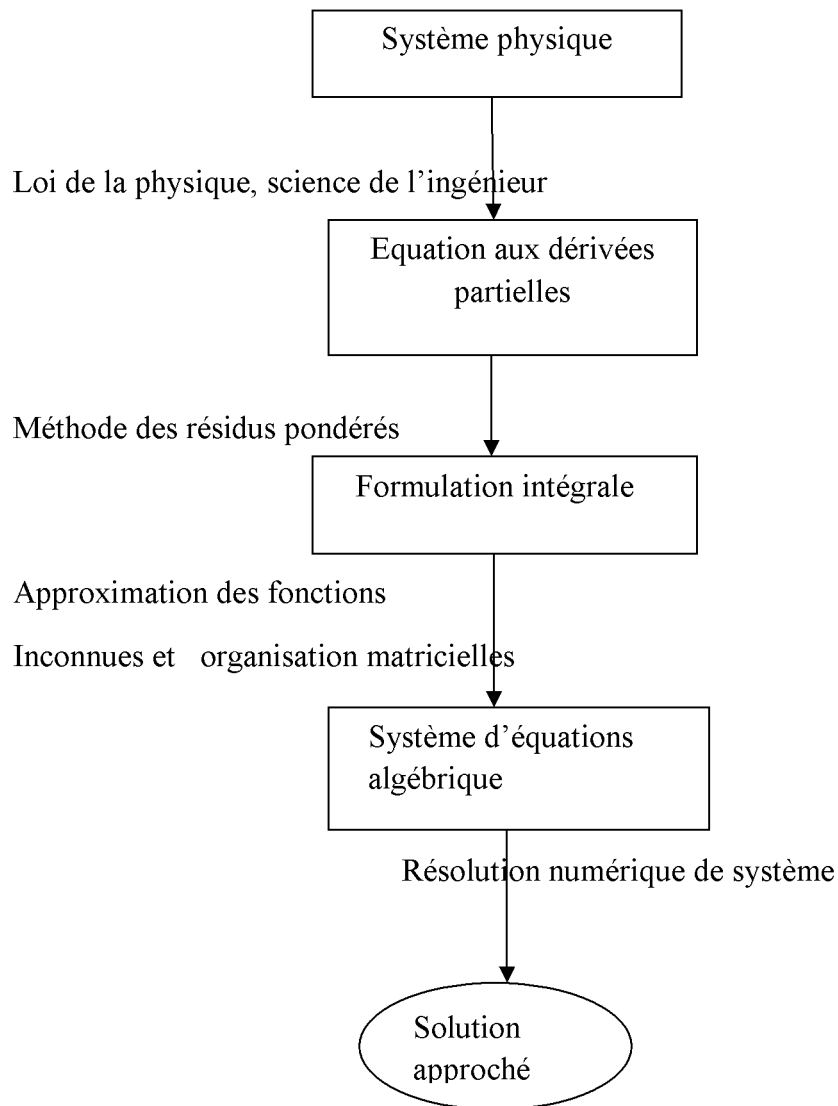


Figure (IV.3) : Transformation des équations d'un système physique par la MEF.

IV.5 Présentation de la méthode des éléments finis(MEF)

IV.5.1 Transformation de l'EDP a une formulation d'intégrale

Cette forme intégrale est soit de type variationnelle ou type résidus pondérés.

IV.5.1.a Formulation variationnelle de Ritz

La formulation variationnelle se base sur la connaissance de l'expression de l'énergie du système à étudier qui est appelée variationnelle d'énergie [34][30].

La formulation d'énergie est donnée par :

$$F(A) = \int L(A) d\Omega$$

Avec Ω est le domaine d'étude.

$L(A)$: fonction de Lagrange déduite de la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle du système.

$$L(A) = W_c - W_p$$

W_c : Énergie cinétique du système.

W_p : Énergie potentielle du système.

Pour un problème magnéstatique la fonction L est donnée par l'expression :

$$L(A) = \int_0^B v B dB - J_s A$$

La fonction d'énergie est donnée alors comme suit :

$$F(A) = \int \left[\int_0^B v B dB - J_s A \right] d\Omega$$

Avec :

L : Fonction de Lagrange.

A : Potentiel vecteur magnétique [T.m].

J : Densité de courant [A/m^2].

v : Réactivité magnétique [H/m]⁻¹.

B : module de l'induction magnétique [T].

La résolution du problème variationnelle défini par la fonction d'énergie $F(A)$ revient à minimiser cette fonctionnelle.

La minimisation s'effectue en utilisant le principe de Rayleigh-Ritz qui consiste à écrire :

$$\frac{\partial F(A)}{\partial A_i} = 0 \text{ Ou } \frac{\partial F(A)}{\partial A_1} = \frac{\partial F(A)}{\partial A_2} = \frac{\partial F(A)}{\partial A_3} = \dots = \frac{\partial F(A)}{\partial A_n}$$

n : nombre de nœud dans le domaine d'étude.

A_i : Inconnue au nœud i du domaine.

IV.5.1.b Formulation des Résidus pondérés (méthode de Galerkinge)

La méthode des résidus pondérés utilise des fonctions de pondérations Φ_i permettent de passer d'un système d'équation EDP à une fonction d'intégral [38] [23].

La méthode des résidus pondérés est basée sur la détermination du résidu par :

$$R(A) = L(A) - f_v$$

R : est le résidu de l'approximation.

L(A) : Opérateur différentiel.

f_v : Fonction source dans le domaine d'étude.

A l'aide de la fonction de projection bien choisie on impose à l'intégrale du résidu de s'annuler en n points du domaine Ω .

$$\int \alpha_i \cdot R(A) \cdot d\Omega = \int \alpha_i (L(A) - f_v) d\Omega$$

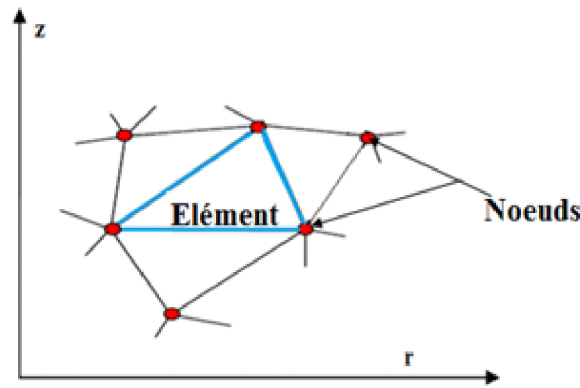
α_i : Fonction de projection ou de pondération.

Parmi les fonctions de projection on choisit la méthode de GALERKINE. Cette méthode choisi les fonctions de projection identiques aux fonctions d'approximation

La méthode de GALERKINE est la plus utilisée en Electrotechnique, puisque elle conduit à un système matriciel symétrique.

IV.5.2 Discrétisation et approximation

La discrétisation est une étape importante dans l'analyse par éléments finis car la précision de la solution dépend de la méthode de discrétisation. Dans cette étape chaque domaine est subdivisé en sous domaine appelés « élément » et les points constituant ces élément sont appelé « nœuds ». Sur chaque point est calculé un potentiel, Figure (IV.3) [34].



Figure(IV.3) : Discrétisation en Elément finis en deux dimensions.

Selon que le domaine d'étude, soit à une, deux ou trois dimensions, les éléments seront choisis en fonction du degré de la courbure d'interpolation qui leur est associés .On rencontre Le plus souvent des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques tel que donné par la figure (IV.4) [34].

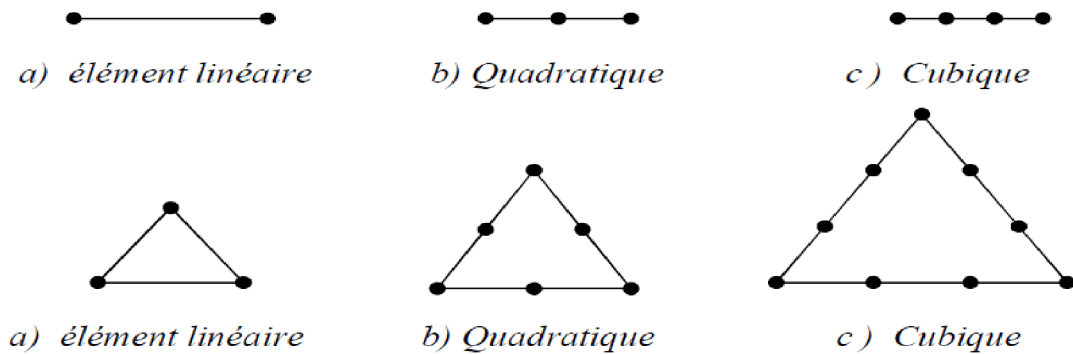


Figure (IV.4) : éléments classiques en une et deux dimensions.

La technique consiste à subdiviser le domaine d'intérêt Ω en un nombre fini de sous domaines élémentaires Ω_i de dimensions finies (éléments finis) sur lesquels la solution est approchée par la formulation polynomiale :

$$A_{ex} = \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{Bmatrix} \langle N_1(x)N_2(x) \dots N_n(x) \rangle$$

A_{ex} : Fonction d'approximation associée a un élément.

A_1, A_2, \dots, A_n : les valeurs de A_{ex} aux n^e nœuds d'interpolation de l'élément ils s'appellent variables nodales.

N_1, N_2, \dots, N_n : fonction d'interpolation associée à un élément

La fonction de l'inconnue en tout point :

$$A(x)^e = \sum_{j=1}^n N(x)^j * A_j^e$$

n : nombre de nœuds

$N(x)^j$: Fonction d'interpolation.

A_j^e : Valeur de l'inconnue au nœud j de l'élément e .

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes approches et méthodes catégories des méthodes de résolutions des équations aux dérivées partielles (MSV, MCC, PEEC, MDF, MEF), ainsi que les avantages et les inconvénients pour chacune d'elles. L'utilisation des méthodes numériques pour la résolution des dispositifs électromagnétiques est devenue une option incontournable à la vue des avantages qu'elles présentent dans la prise en compte des non linéarités et des géométries complexes. Parmi les méthodes présentées pour la résolution de notre problème la méthode des éléments finis est adaptée pour établir les formulations intégrales des équations magnétostatique et magnétodynamique utilisées dans la modélisation des machines linéaires.

Chapitre V : Modélisation des machines électriques linéaires

V.1 Introduction	57
V.2 Modèles électromagnétique des machines linéaires	57
V.3 Formulation élément finis des modèles électromagnétiques EM	59
V.4 Calcul des grandeurs globales	64
V.5 Simulation du mouvement	69
V.6 Les méthodes de raccordement de maillages fixe et mobile	71
V.7 Conclusion	74

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord détailler la méthode des éléments finis appliqués pour la modélisation des machines linéaires, puis nous donnerons les différentes méthodes de calcul des forces magnétiques ainsi que les différentes techniques de prise en compte du mouvement pour des dispositifs électromagnétiques ayant des structures en déplacement.

V.2 Modèles électromagnétiques des machines linéaires

Les machines linéaires peuvent se mettre sous la forme du schéma de principe présenté sur la figure (V.1). En effet, ces machines présentent des bobines (J_s, σ, μ_0), des matériaux ferromagnétiques non conducteurs (μ), des matériaux amagnétiques conducteurs (σ, μ) et des aimants permanents (B_r).

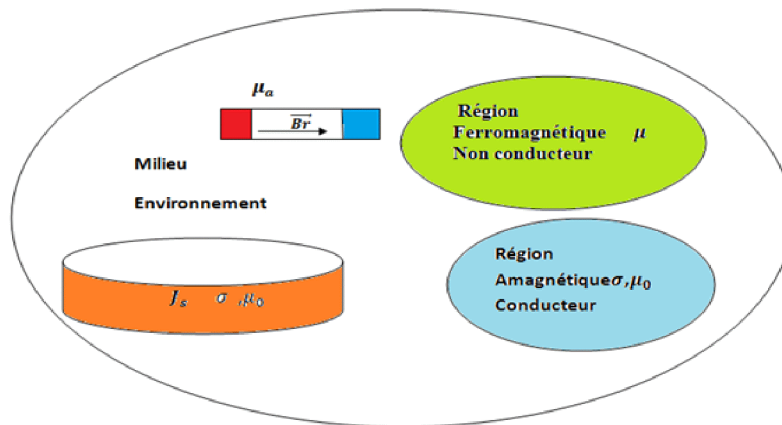


Figure (V.1) : Schéma de principe Général des machines linéaires

Pour les différentes régions du système, l'équation aux dérivées partielles (EDP) exprimée en terme de potentiel vecteur magnétique d'après l'équation (III.26) est :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} (\vec{\nabla} \wedge \vec{A}) \right) = \begin{cases} 0 & \text{air ou l'entrefer } \mu_r = 1 \\ 0 & \text{Tôles magnétique } \mu_r \neq 1 \\ \vec{J}_s - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} & \text{Bobine conductrices} \\ -\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} & \text{Milieux conducteur} \\ \vec{\nabla} \wedge \left(\frac{\vec{B}_r}{\mu_a} \right) & \text{Aimant permanent} \end{cases} \quad \text{V.1}$$

La densité de courant de source ainsi que le potentiel vecteur magnétique ne présentent que une seul composante tel que :

$$\vec{A} = (0, A_\varphi, 0) , \vec{J}_s = (0, J_{s\varphi}, 0) \text{ et } \vec{B}_r = (B_{rr}, 0, B_{rz})$$

En coordonnées cylindrique 2D dans le plan (r, z), l'EDP précédente pour chaque région s'exprime comme suit :

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \left(\frac{\partial r A_\varphi}{\partial r} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v}{r} \left(\frac{\partial r A_\varphi}{\partial z} \right) \right) = \begin{cases} 0 \\ 0 \\ J_{s\varphi} - \frac{\sigma}{r} \frac{\partial A}{\partial t} \\ - \frac{\sigma}{r} \frac{\partial r A_\varphi}{\partial t} \\ + \frac{1}{\mu_a} \left(\frac{\partial B_{rz}}{\partial r} - \frac{\partial B_{rr}}{\partial z} \right) \end{cases} \quad \text{V.2}$$

Avec $v = \frac{1}{\mu}$

En considérant comme inconnue le potentiel vecteur modifié : $A = rA_\varphi$, l'équation (V.2) devient :

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \left(\frac{\partial A}{\partial r} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v}{r} \left(\frac{\partial A}{\partial z} \right) \right) = \begin{cases} 0 \\ 0 \\ + J_{s\varphi} - \frac{\sigma}{r} \frac{\partial A}{\partial t} \\ - \frac{\sigma}{r} \frac{\partial A}{\partial t} \\ + \frac{1}{\mu_a} \left(\frac{\partial B_{rz}}{\partial r} - \frac{\partial B_{rr}}{\partial z} \right) \end{cases} \quad \text{V.3}$$

En considérant le régime harmonique, l'équation(V.3) s'écrit :

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \left(\frac{\partial A}{\partial r} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v}{r} \right) = \begin{cases} 0 \\ 0 \\ +Js_{\varphi} - \frac{\sigma}{r} j\omega A \\ -\frac{\sigma}{r} j\omega A \\ +\frac{1}{\mu_a} \left(\frac{\partial B_{rz}}{\partial r} - \frac{\partial B_{rr}}{\partial z} \right) \end{cases} \quad \text{V.4}$$

V.3 Formulation élément finis des modèles électromagnétiques EM

La formulation intégrale de l'équation (V.4) est donnée par :

$$-\iint \alpha_i \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v}{r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) \right] drdz = \begin{cases} 0 \\ 0 \\ \iint \alpha_i \cdot Js_{\varphi} \cdot drdz - j\omega \iint \alpha_i \cdot \sigma \cdot A \frac{drdz}{r} \\ -j\omega \iint \alpha_i \cdot \sigma \cdot A \frac{drdz}{r} \\ +\frac{1}{\mu_a} \iint \alpha_i \left[\frac{\partial B_{rz}}{\partial r} - \frac{\partial B_{rr}}{\partial z} \right] drdz \end{cases} \quad \text{V.5}$$

L'application du théorème de Green, nous permet d'écrire :

$$\iint \frac{v}{r} \left[\frac{\partial \alpha_i}{\partial r} \cdot \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial \alpha_i}{\partial z} \cdot \frac{\partial A}{\partial z} \right] drdz = -\iint \frac{v}{r} \overrightarrow{\nabla A} \cdot \overrightarrow{\nabla \alpha_i} drdz - \int \frac{v}{r} \frac{\partial A}{\partial n} \alpha_i d\Gamma \quad \text{V.6}$$

En remplaçant (V.6) dans(V.5), on aura :

$$-\iint \frac{v}{r} \vec{\nabla} A \cdot \vec{\nabla} \alpha_i drdz - \int \frac{v}{r} \frac{\partial A}{\partial n} \alpha_i d\Gamma = \begin{cases} 0 \\ 0 \\ \iint \alpha_i \cdot J s_{\varphi} \cdot drdz - j\omega \iint \alpha_i \cdot \sigma \cdot A \frac{drdz}{r} \\ -j\omega \iint \alpha_i \cdot \sigma \cdot A \frac{drdz}{r} \\ + \frac{1}{\mu_a} \iint \alpha_i [\vec{\nabla} \wedge \vec{B}_r] drdz \end{cases} \quad V.7$$

En considérant des conditions aux limites type Dirichlet ou Newman homogène, le terme sur la frontière s'annule :

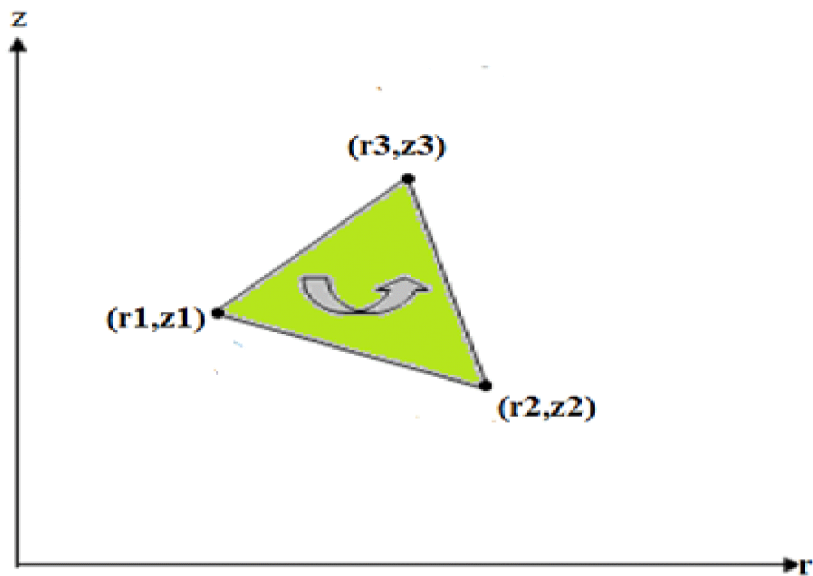
$$\int \frac{v}{r} \frac{\partial A}{\partial n} \alpha_i d\Gamma = 0 \quad V.8$$

L'équation V.7 devient alors :

$$-\iint \frac{v}{r} \vec{\nabla} A \cdot \vec{\nabla} \alpha_i drdz = \begin{cases} 0 \\ 0 \\ \iint \alpha_i \cdot J s_{\varphi} \cdot drdz - j\omega \iint \alpha_i \cdot \sigma \cdot A \frac{drdz}{r} \\ -j\omega \iint \alpha_i \cdot \sigma \cdot A \frac{drdz}{r} \\ + \frac{1}{\mu_a} \iint \alpha_i [\vec{\nabla} \wedge \vec{B}_r] drdz \end{cases} \quad V.9$$

Pour un élément du maillage du type triangulaire du premier ordre figure(V.2), le potentiel vecteur magnétique s'exprime sous la forme approximation suivante :

$$A_{\varphi}^e(r, z) = a + br + cz \quad V.10$$



Figure(V.2) : Élément triangulaire.

Les potentiels A_1, A_2 et A_3 en chaque nœud 1, 2 et 3 sont obtenus en utilisant l'expression précédente tel que :

$$A_{\varphi 1} = a + br_1 + cz_1 \quad \text{V.11.a}$$

$$A_{\varphi 2} = a + br_2 + cz_2 \quad \text{V.11.b}$$

$$A_{\varphi 3} = a + br_3 + cz_3 \quad \text{V.11.c}$$

D'où l'écriture matricielle

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_1 & z_1 \\ 1 & r_2 & z_2 \\ 1 & r_3 & z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad \text{V.12}$$

Les coefficients d'approximation polynomiale s'expriment comme suit :

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_1 & z_1 \\ 1 & r_2 & z_2 \\ 1 & r_3 & z_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} \quad \text{V.13}$$

Après calcul des fonctions d'approximation a, b, c et leurs introduction dans l'expression de fonction d'approximation du potentiel, on trouve la forme suivante :

$$A_{\varphi}^e(r, z) = [1 \quad r \quad z] \left(\frac{1}{2\Delta^e} \right) \begin{bmatrix} r_2 z_3 - r_3 z_2 & r_3 z_1 - r_1 z_3 & r_1 z_2 - r_2 z_1 \\ z_2 - z_3 & z_3 - z_1 & z_1 - z_2 \\ r_3 - r_2 & r_1 - r_3 & r_2 - r_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} \quad \text{V.14}$$

Δ^e Représente l'air de chaque élément triangulaire.

Le potentiel s'écrit sous la forme suivante :

$$A_{\varphi}^e(r, z) = \sum_{j=1}^3 \frac{1}{2\Delta^e} (a_j + b_j r + c_j z) A_j$$

$$A_{\varphi}^e(r, z) = \frac{1}{2\Delta^e} (a_1 + b_1 r + c_1 z) A_1 + \frac{1}{2\Delta^e} (a_2 + b_2 r + c_2 z) A_2 + \frac{1}{2\Delta^e} (a_3 + b_3 r + c_3 z) A_3 \quad \text{V.15}$$

$$A_{\varphi}^e(r, z) = N_1(r, z) A_1 + N_2(r, z) A_2 + N_3(r, z) A_3 = [N_1(r, z) \quad N_2(r, z) \quad N_3(r, z)] \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}$$

V.16

Le gradient de A s'exprime comme suit :

$$\frac{1}{r} \vec{\nabla} A(r, z) = \vec{\nabla} N_j(r, z) A_j = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_j}{\partial r} \\ \frac{\partial N_j}{\partial z} \end{bmatrix} A_j = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial r} \vec{e}_r & \frac{\partial N_2}{\partial r} \vec{e}_r & \frac{\partial N_3}{\partial r} \vec{e}_r \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} \vec{e}_z & \frac{\partial N_2}{\partial z} \vec{e}_z & \frac{\partial N_3}{\partial z} \vec{e}_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{2\Delta^e} \begin{bmatrix} b_1 \vec{e}_r & b_2 \vec{e}_r & b_3 \vec{e}_r \\ c_1 \vec{e}_z & c_2 \vec{e}_z & c_3 \vec{e}_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{r} \vec{\nabla} A(r, z) = \frac{1}{2\Delta^e} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}$$

L'utilisation de la méthode de Galerkin consiste à choisir comme fonctions de pondération les fonctions d'interpolations.

$$\alpha_1(r, z) = N_1(r, z) \alpha_2(r, z) = N_2(r, z) \alpha_3(r, z) = N_3(r, z) \quad \text{V.17}$$

$$\vec{\nabla}\alpha_i(r, z) = \begin{bmatrix} \frac{\partial\alpha_i}{\partial r} \\ \frac{\partial\alpha_i}{\partial z} \end{bmatrix} \quad \text{V.18}$$

De la même façon que précédant on trouve :

$$\vec{\nabla}\alpha_i(r, z) \quad \text{V.19}$$

Alors pour chaque nœud du maillage on a :

$$\iint_r \frac{v}{r} \vec{\nabla}A \cdot \vec{\nabla}\alpha_i drdz = \iint v \frac{1}{2\Delta^e} \begin{bmatrix} b_1 & c_1 \\ b_2 & c_2 \\ b_3 & c_3 \end{bmatrix} \frac{1}{2\Delta^e} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} drdz \quad \text{V.20}$$

$$\iint_r \frac{v}{r} \vec{\nabla}A \cdot \vec{\nabla}\alpha_i drdz = \frac{v}{4\Delta^e} \begin{bmatrix} b_1b_1 + c_1c_1 & b_1b_2 + c_1c_2 & b_1b_3 + c_1c_3 \\ b_1b_2 + c_1c_2 & b_2b_2 + c_2c_2 & b_2b_3 + c_2c_3 \\ b_1b_3 + c_1c_3 & b_2b_3 + c_2c_3 & b_3b_3 + c_3c_3 \end{bmatrix} \quad \text{V.21}$$

$$\iint \alpha_i \cdot \sigma \cdot A \frac{drdz}{r} = \sigma \frac{\Delta^e}{12} \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{V.22}$$

$$\frac{1}{\mu_a} \iint \alpha_i \left[\frac{\partial B_{rz}}{\partial r} \right] drdz = \frac{1}{\mu_a} \frac{1}{2\Delta^e} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad \text{V.23}$$

$$\iint \alpha_i \cdot J_{s\varphi} \cdot drdz = \frac{\Delta^e}{3} J_{s\varphi} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{V.24}$$

L'assemblage des matrices élémentaires des N_t éléments triangulaire contenant N nœuds conduit au système algébrique suivant :

$$[M] \cdot \{A\} + j\omega[L] \cdot \{A\} = \{K\} \quad \text{V.25}$$

Avec :

$$M_{ij} = \iint \frac{v}{r} \vec{\nabla} A \cdot \vec{\nabla} \alpha_i dr dz \quad \text{V.26.a}$$

$$L_{ij} = \iint \alpha_i \cdot \sigma \cdot A \frac{dr dz}{r} \quad \text{V.26.b}$$

$$K_i = \iint \alpha_i \cdot J s_{\varphi} \cdot dr dz + \frac{1}{\mu_a} \iint \alpha_i [\vec{\nabla} \wedge \vec{B}_r] dr dz \quad \text{V.26.c}$$

$$\bar{A} = A_r + j A_i \quad \text{V.26.d}$$

Ou :

A_r : est la partie réelle de \bar{A} .

A_i : est la partie imaginaire de \bar{A} .

V.4 Calcul des grandeurs globales

V.4.1 Equation de l'énergie électromagnétique

L'équation de conservation de l'énergie électromagnétique pour un milieu rayonnant une puissance exprimer par le vecteur painting, peut se déduire à partir des équations de maxwell (III.3) et (III.4):

$$\vec{H} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\vec{H} \frac{d\vec{B}}{dt}$$

$$\vec{E} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{H}) = \vec{E} \vec{J} \vec{c} + \vec{E} \frac{d\vec{D}}{dt}$$

$$\vec{H} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{E}) - \vec{H} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{E}) = \vec{E} \vec{J} \vec{c} + \vec{E} \frac{d\vec{D}}{dt} + \vec{H} \frac{d\vec{B}}{dt} \quad \text{V.29}$$

$$\text{Sachant que : } -\vec{\nabla} \cdot (\vec{E} \wedge \vec{H}) = \vec{E} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{H}) - \vec{H} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{E}) \quad \text{V.27}$$

Alors :

$$-\vec{\nabla} \cdot (\vec{E} \wedge \vec{H}) = \vec{E} \vec{J} \vec{c} + \vec{E} \frac{d\vec{D}}{dt} + \vec{H} \frac{d\vec{B}}{dt} \quad \text{V.28}$$

On intégrant cette relation en volume on obtient les densités d'énergie :

$$\iiint -\vec{\nabla} \cdot (\vec{E} \wedge \vec{H}) dV = \iiint \vec{E} \cdot \vec{J} \vec{c} dV + \iiint \vec{E} \frac{d\vec{D}}{dt} dV + \iiint \vec{H} \frac{d\vec{B}}{dt} dV \quad \text{V.29}$$

$$dW_{joule} = \vec{E} \cdot \vec{J}_C \quad \text{V.30.a}$$

$$dW_{elec} = \vec{E} \frac{d\vec{D}}{dt} \quad \text{V.30.b}$$

$$dW_{mag} = \vec{H} \frac{d\vec{B}}{dt} \quad \text{V.30.c}$$

Sachant que : $\vec{E} \wedge \vec{H} = \vec{P}$ le vecteur POYNTING

La puissance rayonnée par une surface S est égale à la somme des puissances dissipées dans un volume V.

$$\iiint -\vec{\nabla} \cdot (\vec{E} \wedge \vec{H}) dV = \iint (\vec{E} \wedge \vec{H}) \cdot d\vec{S} \quad \text{V.31}$$

$$P_j = \iiint \vec{E} \cdot \vec{J}_C dV : \text{Pertes joules.} \quad \text{V.32}$$

$$W_{elec} = \iiint \vec{E} \cdot \frac{d\vec{D}}{dt} dV : \text{Pertes diélectrique.} \quad \text{V.33}$$

$$W_{mag} = \iiint \vec{H} \cdot \frac{d\vec{B}}{dt} dV : \text{Pertes magnétique.} \quad \text{V.34}$$

V.4.2 Calcul de l'inductance

Pour le calcul de l'inductance on peut utiliser deux méthodes, la première basée sur la connaissance de l'énergie magnétique W_{mag} , et la deuxième par la connaissance du flux magnétique Φ .

- L'énergie stockée dans l'inductance magnétisante a pour expression :

$$W_{mag} = \frac{1}{2} LI^2 \quad \text{V.35}$$

- Le flux magnétique à travers un élément en surface $d\vec{S}$ pour expression :

$$\Phi = L \cdot I = \iint \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad \text{V.36}$$

V.4.3 Méthodes de calcul des forces magnétiques

Théoriquement quelque soit la formulation utilisée pour calculer la force magnétique globale, le résultat est le même. Cependant lorsque ces résultats étant issus de la méthode des éléments finis (solution approchée) diffèrent sensiblement selon la qualité du maillage utilisée pour résoudre le système.

Plusieurs méthodes permettent le calcul des forces magnétiques qui agissent sur un matériau ferromagnétique, Ces méthodes constituent un outil simple et efficace pour calculer aussi bien la densité de force que la magnétique globale, elles sont:

- La Méthode de la force de Lorentz.
- La méthode du tenseur de Maxwell.
- La méthode des travaux virtuels.
- La méthode de la variation de la Co-énergie ou de l'énergie magnétique.

V.4.3.a Méthode de la force de Lorentz

La force électromagnétique de Lorentz, résulte de la coexistence d'une induction magnétique résultante d'une source d'excitation et d'une densité de courant induite dans un milieu conducteur[30].

L'expression de la force est la suivante :

$$F = \iiint (\vec{J}_c \wedge \vec{B}) dv \quad \text{V.37}$$

Pour $A = (0, A_\varphi, 0)$

$$B_r = -\frac{\partial(rA_r)}{\partial z} \quad \text{V.38}$$

$$B_z = +\frac{1}{r} \frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial r} \quad \text{V.39}$$

La force de Lorentz dans le cas axisymétrique 2D :

$$\vec{J}_c \wedge \vec{B} = \begin{vmatrix} \vec{u}_r & \vec{u}_\varphi & \vec{u}_z \\ 0 & J_{c\varphi} & 0 \\ B_r & 0 & B_z \end{vmatrix}$$

$$\vec{J}_c \wedge \vec{B} = (J_{c\varphi} \cdot B_z) \vec{u}_r - (J_{c\varphi} \cdot B_r) \vec{u}_z \quad \text{V.40}$$

$$F_r = \iiint (J_{c\varphi} \cdot B_z) dV = \int_0^r \int_0^{2\pi} \int_0^z r J_{c\varphi} \cdot B_z dr d\varphi dz \quad \text{V.41.a}$$

$$F_z = - \iiint (J_\varphi \cdot B_r) dV = \int_0^r \int_0^{2\pi} \int_0^z -r J_\varphi \cdot B_r dr d\varphi dz \quad \text{V.41.b}$$

En 2D coordonné cylindrique on a :

$$F_r = 2\pi \iint J_{c\varphi} B_z r dr dz \quad \text{V.42.a}$$

$$F_z = -2\pi \iint J_{c\varphi} B_r r dr dz \quad \text{V.42.b}$$

V.4.3.b Méthode des tenseurs de Maxwell

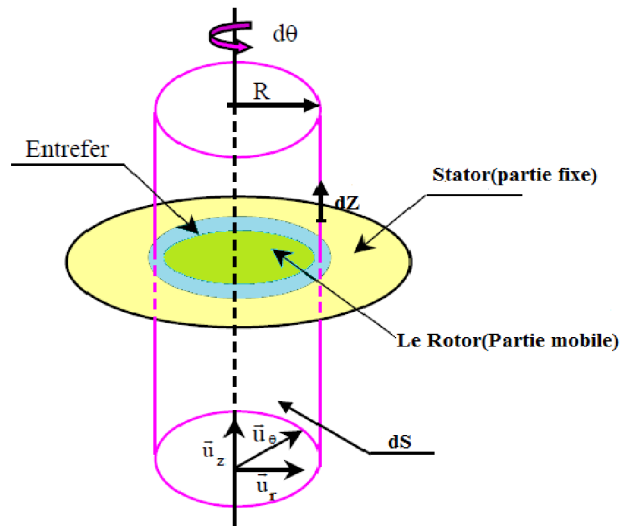
Le tenseur de Maxwell permettra d'étudier la force s'exerçant sur un matériau de volume V, en connaissant seulement la répartition de champ aux différents points d'une surface fermé entourant le volume en question. Le système peut contenir des matériaux magnétiques (linéaires ou non-linéaires), des conducteurs ou des régions inductrices caractérisées par une densité de courant uniforme [35] [17]. La surface d'intégration de Maxwell est donnée par la figure (V.4).

La force axiale de la force de poussé est :

$$F_z = \frac{2\pi}{\mu_0} R \int B_r B_z dz \quad \text{V.43}$$

La force radial de la force de poussé est :

$$F_r = \frac{2\pi}{\mu_0} R \int (B_r^2 - B_z^2) dz \quad \text{V.44}$$



Figure(V.3) : Surface d'intégration du tenseur de Maxwell [17].

dS : est un contour fermé passant à l'intérieur de l'entrefer peuvent être cylindrique de rayon R pour une structure axisymétrique.

\vec{n} : La normale extérieure à dS .

V.4.3.c La méthode de la variation de l'énergie magnétique ou la Co-énergie

- Calcul de l'énergie magnétique

L'énergie magnétique s'obtient par la connaissance de l'évolution de l'induction en fonction du champ magnétique.

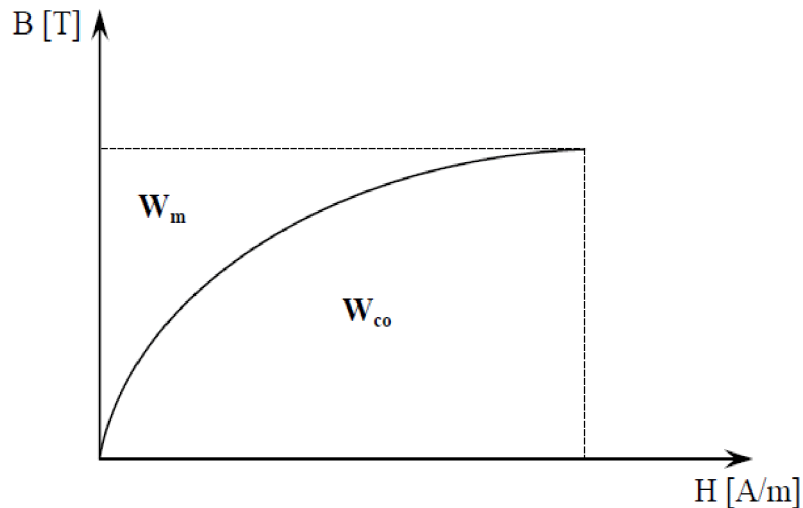


Figure (V.4) : Courbe B-H .

L'énergie magnétique est donnée par l'équation suivante :

$$W_{mag} = \iiint \left(\int_0^B H dB \right) dV \quad \text{V.45}$$

Sachant que : $\vec{B} = \mu \vec{H}$

$$W_{mag} = \iiint \Delta W_{mag} = \iiint \left(\frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} \right) dV \quad \text{V.46}$$

La méthode de la variation de l'énergie est basée sur la variation de l'énergie magnétique provoquée par un déplacement, en maintenant le flux constant:

$$F_m = - \left. \frac{\partial W_{mag}}{\partial z} \right|_{flux=cst} \quad \text{V.47}$$

avec :

x : La variation spatiale de la coordonnée.

Pour obtenir la force magnétique par la Co-énergie, on calcule la dérivée de la Co-énergie magnétique par rapport au déplacement, en maintenant le courant constant [36].

$$F_m = - \left. \frac{\partial W_{mag}^{co}}{\partial z} \right|_{I=cst} \quad V.48$$

V.4.3.d La méthode des travaux virtuels

Cette méthode consiste à dériver une expression de l'énergie magnétique, cette expression s'écrit en fonction des grandeurs de la méthode des éléments finis (potentiel vecteur A, la matrice de rigidité M). Cette méthode présente un avantage, elle s'adapte à la MEF et fournit une bonne précision [36] [30].

V.5 Simulation du mouvement

Les dispositifs électromagnétiques possèdent des parties de mouvement de rotation pour les machines électriques, en translation pour les machines linéaires (lanceur, électro-aimant, génératrice linéaire tubulaire...etc.) .Pour la modélisation d'un tel système, on a besoin de développer des techniques permettant la prise en compte du mouvement ce qui fait l'objet de diverses études.

Lorsqu'on effectue une simulation pour un mouvement d'un système électromagnétique avec la méthode des éléments finis, divers techniques numériques sont envisageables. On peut les classer en deux catégories :

- Les méthodes directes basées sur l'utilisation d'un seul référentiel indépendant de la position de la partie mobile.
- Les méthodes basées sur l'utilisation de deux référentiels, l'un mobile lié à la partie mobile et l'autre fixe lié à la partie fixe.

Dans le système à deux repères, les techniques de prise en compte du mouvement sont mises dans cet ordre :

- Les techniques de remaillage (local ou global)
- Les méthodes de raccordement de maillages fixe et mobile.

V.5.1 Les techniques de remaillages

V.5.1.a Remaillage complet ou partiel (Bande de mouvement)

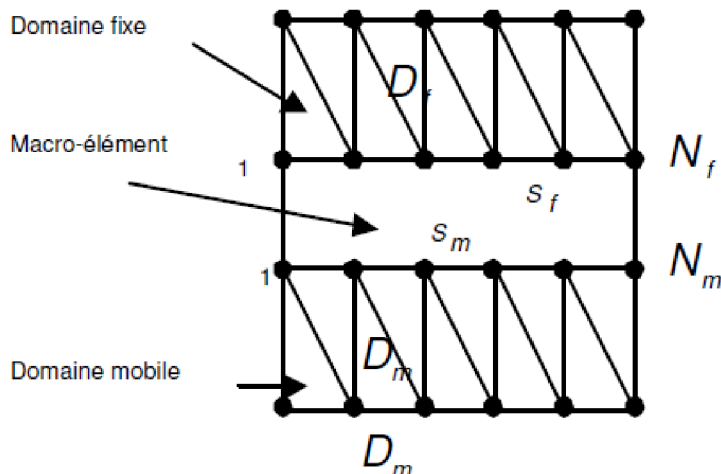
Le principe de cette méthode consiste à remailler complètement la géométrie du domaine pour chaque déplacement de la partie mobile, ce qui signifie la nécessité d'existence d'un générateur de maillage automatique capable de produire un maillage optimale et homogène. Donc le remaillage complet impose un couplage entre le code de calcul par éléments finis et le mailleur automatique.

La méthode de Bande de mouvement est basée sur le remaillage dans la partie de l'entrefer à chaque déplacement, en maintenant les autres pièces fixes et mobiles. Cette technique consiste à créer une bande d'éléments réguliers dans l'entrefer reliant les parties fixes et mobiles c'est la bande de mouvement. A chaque fois que la partie mobile se déplace, la bande de mouvement est démaillée, les nœuds du maillage mobile sont déplacés, la bande est remaillée.

L'utilisation d'une bande de mouvement permet de maintenir les propriétés de la matrice éléments finis (creuse et symétrique). Cette méthode est avantageuse par rapport à la technique du remaillage complet par sa rapidité d'exécution, il suffit juste de corriger les termes de la matrice élémentaire des éléments situés dans la bande de mouvement[26].

V.5.1.b Méthode du macro-élément

Cette méthode a été appliquée en premier lieu pour la prise en compte du mouvement dans les machines électriques tournantes dont les avantages sont la souplesse d'utilisation du problème global. Le principe est basé sur l'expression analytique du champ dans l'entrefer non maillé vue comme un seul élément fini mais possédant des nœuds sur la partie fixe et mobile. Donc l'entrefer constitue alors d'une sorte d'élément fini à plusieurs nœuds, dont elle tire son nom macro-élément[31].



Figure(V.5) : Prise en compte du mouvement par macroélément [26].

La méthode consiste à trouver une solution analytique de l'équation de Laplace dans l'entrefer par la méthode de séparation des variables. On obtient la solution par un développement en série de Fourier. Pour obtenir une bonne précision, il faut utiliser un grand nombre d'harmoniques en série de Fourier, et pour cette raison que le macro-élément prend un temps de calcul important (élevé). Toutefois, les résultats obtenus sont satisfaisants et précis et n'impose pas de contrainte sur le choix du déplacement [31][32].

V.6 Les méthodes de raccordement de maillages fixe et mobile

La connexion du maillage fixe et mobile est conduite au niveau d'une interface qui peut être confondue avec les frontières situées entre les deux.

V.6.1 Méthode d'interpolation nodale

La technique d'interpolation proposée par est basée sur la connexion des nœuds qui se trouvent au bord mobile et aux éléments de la partie fixe. On peut réaliser les maillages de la partie fixe et mobile séparément. Pour chaque nœud de l'interface de couplage du côté mobile, on peut avoir la position de l'élément appartenant au maillage fixe.

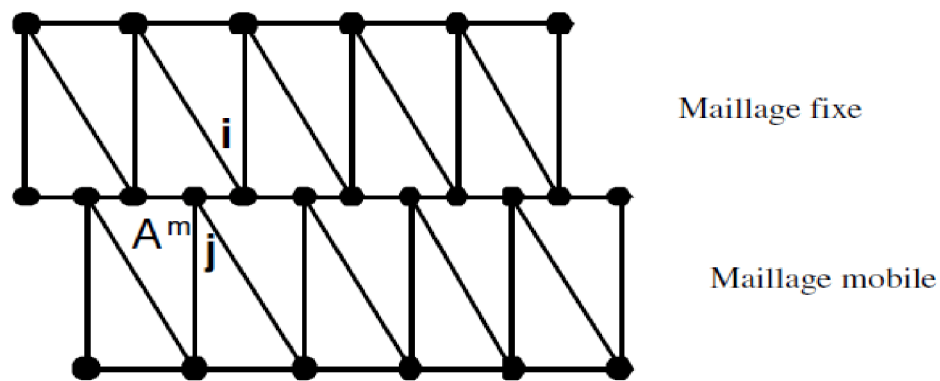


Figure (IV.6) : Recollement de maillage par interpolation nodale[26].

En prenant les fonctions d'interpolation de l'élément fixe, on peut donc écrire le potentiel vecteur magnétique A_j^m au nœud mobile comme suit :

$$A_j^m = \sum_{i=1}^N \alpha_i^j \cdot A_{fi} \quad \text{V.49}$$

avec

α_i^j Sont les fonctions d'interpolation nodales évaluées au nœud j , N est le nombre de nœuds par élément fixe.

A_{fi} Sont les valeurs nodales du potentiel vecteur de l'élément fixe.

Son avantage majeur, elle est indépendante de la formulation utilisée, aussi elle garde sa structure de matrice sans engendrer d'inconnues supplémentaire. Toute fois, son caractère nodal, n'assure qu'en moyenne la continuité du potentiel vecteur.

V.6.2 Méthode de la bande géométrique : affectation des propriétés

Cette méthode permet le traitement des structures en déplacement rectiligne tout en gardant la même topologie du maillage quelle que soit le déplacement utile des parties mobiles du dispositif d'étude. Son principe est de créer une bande géométrique dans le dispositif d'étude, et la subdiviser en sous régions élémentaires définissant ainsi le capteur (dans notre cas les bobines) et une partie de l'air environnement (Figure(V.7)). A ces sous régions sont affectées les propriétés physiques, comme la perméabilité magnétique et la conductivité électrique.

La bande du mouvement est constituée de p nombre de couches, ayant une épaisseur dz . La région constituant les bobines (capteur) on le repère par les couches 1,2 et 3, et la région de l'air par les couches 3,4,...,p-2, p-1, p. De cette façon de repérage du maillage, on affecte les propriétés physiques.

A chaque fois que les bobines se déplacent d'une distance dz (Figure(V.8)), les propriétés affectées aux sous régions vont être changées selon leurs nouvelles appartenances physiques, ainsi le nouveau repérage va être de cette manière, les bobines vont être repérées par les couches 2, 3 et 4 et la région de l'air par les couches 5...p-2, p-1, p [26].

Cette méthode permet la prise en compte des régions en mouvement sans modifier la topologie du maillage. La simulation se fait par simple affectation de propriétés physiques. Néanmoins, cette méthode est simple du point de vue implémentation, mais elle peut générer un maillage dense du fait du prolongement de la géométrie de l'objet le long de la direction de déplacement. Et c'est un inconvénient majeur.

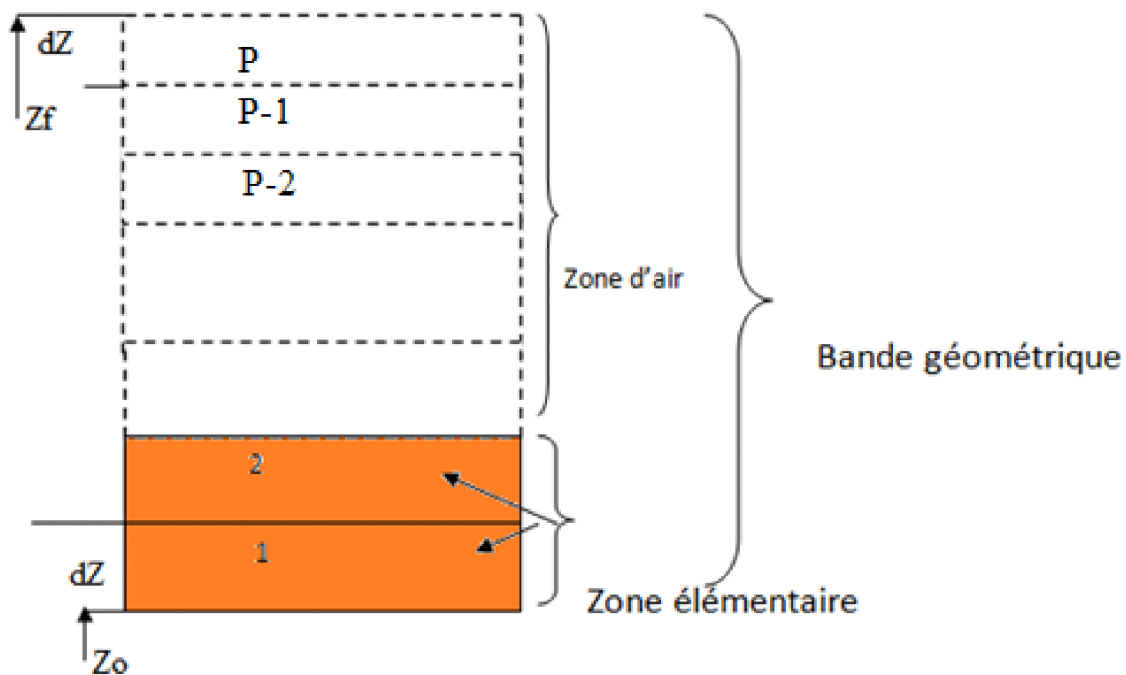


Figure (V.7) :Bande géométrique avant déplacement.

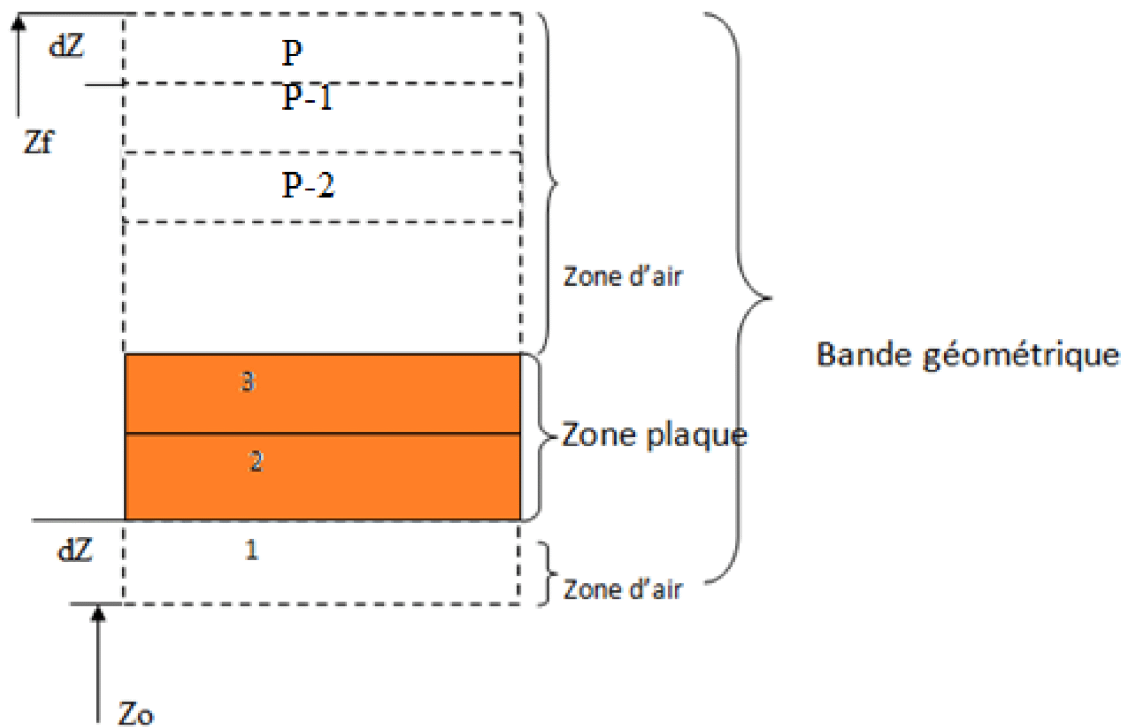


Figure (V.8) :Bande géométrique après un pas de déplacement.

V.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation électromagnétique générale des machines électriques linéaire et plus particulièrement la machine linéaire tubulaire, la méthode des éléments finis appliquée pour la résolution des modèles linéaires, et les différentes techniques de prise en compte du mouvement. Nous avons présenté aussi plusieurs méthodes qui permettent de calculer la force électromagnétique dans les dispositifs électromagnétique a savoir la méthode de Lorentz, la méthode des tenseur de Maxwell, la méthode des travaux virtuel et celles basé sur l'énergie magnétique ou la co-énergie .Bien que chacune de ces méthodes adopte une approche différente pour la détermination de la densité de force , l'intégration de cette dernière par les différents méthodes conduit pratiquement à la même force.

Dans le prochain chapitre, on va utiliser la méthode des éléments finis implémenté sous l'environnement MATLAB pour la modélisation d'une génératrice linéaire tubulaire utilisée pour la production de l'énergie électrique par la force des vagues.

Chapitre VI : Applications et résultats

VI.1 Introduction	75
VI.2 Description du dispositif.....	75
VI.3 Domaine de résolution et conditions aux limites	77
VI.4 Maillage du domaine de résolution	77
VI.5 Modèle d'équation	78
VI.6 Analyse de l'état magnétique de la machine.....	79
VI.7 Calcul des inductances propre et mutuelles des bobines	84
VI.8 Calcul des grandeurs électromagnétiques	85
VI.9 Interprétation des résultats	96
VI.10 Conclusion	97

VI.1 Introduction

Dans ce chapitre, on se propose d'étudier une machine électrique linéaire tubulaire à aimants permanents utilisée pour l'exploitation de l'énergie des vagues pour la production de l'électricité. L'étude concernera une modélisation qui réside principalement dans l'évolution de la force électromotrice induite la fem.

Dans un premier lieu on va étudier l'état magnétique de la machine, l'influence de l'entrefer sur les inductions magnétiques axial et radial et on va s'intéresser aussi aux calculs des inductances dans les bobines et le calcul des grandeurs électromagnétique tel que la force de Lorentz engendré par la machine, et le calcul des flux magnétiques pour chaque pas de déplacement de la partie en mouvement. En second lieu nous allons calculés la force électromotrice induite par cette machine. La simulation sera effectuée avec la méthode des éléments finis sous environnement MATLAB.

VI.2 Description du dispositif

VI.2.1 Dimension géométriques de la génératrice

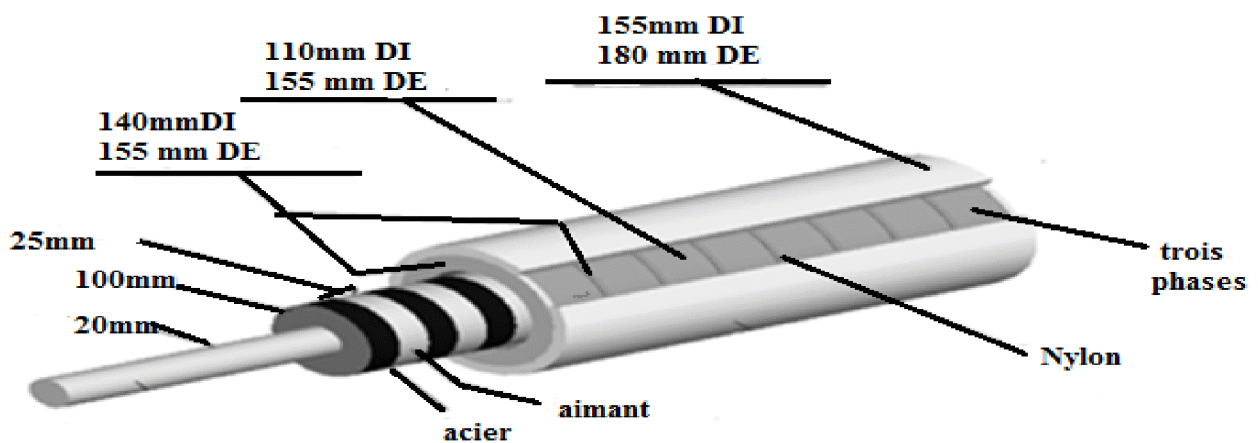


Figure (VI.1) : Dimensions d'une machine tubulaire (3KW) [2].

DI : diamètre intérieur

DE : diamètre extérieur

Composante	La valeur	unité
Diamètre de l'arbre	20	mm
Diamètre extérieur du rotor	100	mm
Entrefer	5	mm
Diamètre intérieur du stator	110	mm
Diamètre extérieur du stator	180	mm
Hauteur des bobines	50	mm
Hauteur d'un aimant	25	mm

Tableau (VI.1) : les dimensions de la génératrice linéaire tubulaire [2]

VI.2.2 Caractéristiques physiques

Milieu \ Caractéristique physique	Conductivité électrique	Perméabilité magnétique relative	Densité de courant
Air	$\sigma = 0$	$\mu_{r_air} = 1$	$J = 0$
Arbre	$\sigma = 0$	$\mu_{r_arbre} = 1$	$J = 0$
Acier	$\sigma = 1 * 10^6$	$\mu_{r_acier} = 4000$	$J = 0$
Aimant	$\sigma = 0$	$\mu_{r_aimant} = 1.1$	$J = 0$
Bobine	$\sigma = 6.5 * 10^7$	$\mu_{r_bobine} = 1$	$J_{exc} = 1.33.10^7$ Nombre de spire : 230

Tableau (VI.2) : Caractéristiques physiques de la génératrice linéaires tubulaire [2].

VI.3 Domaine de résolution et conditions aux limites

Notre dispositif à étudier est un système ayant une symétrie, ce qui nous permet de prendre en considération une partie du domaine d'étude, et sur les frontières de celle-ci on impose les conditions aux limites du type Dirichlet comme le montre la figure(VI.3).

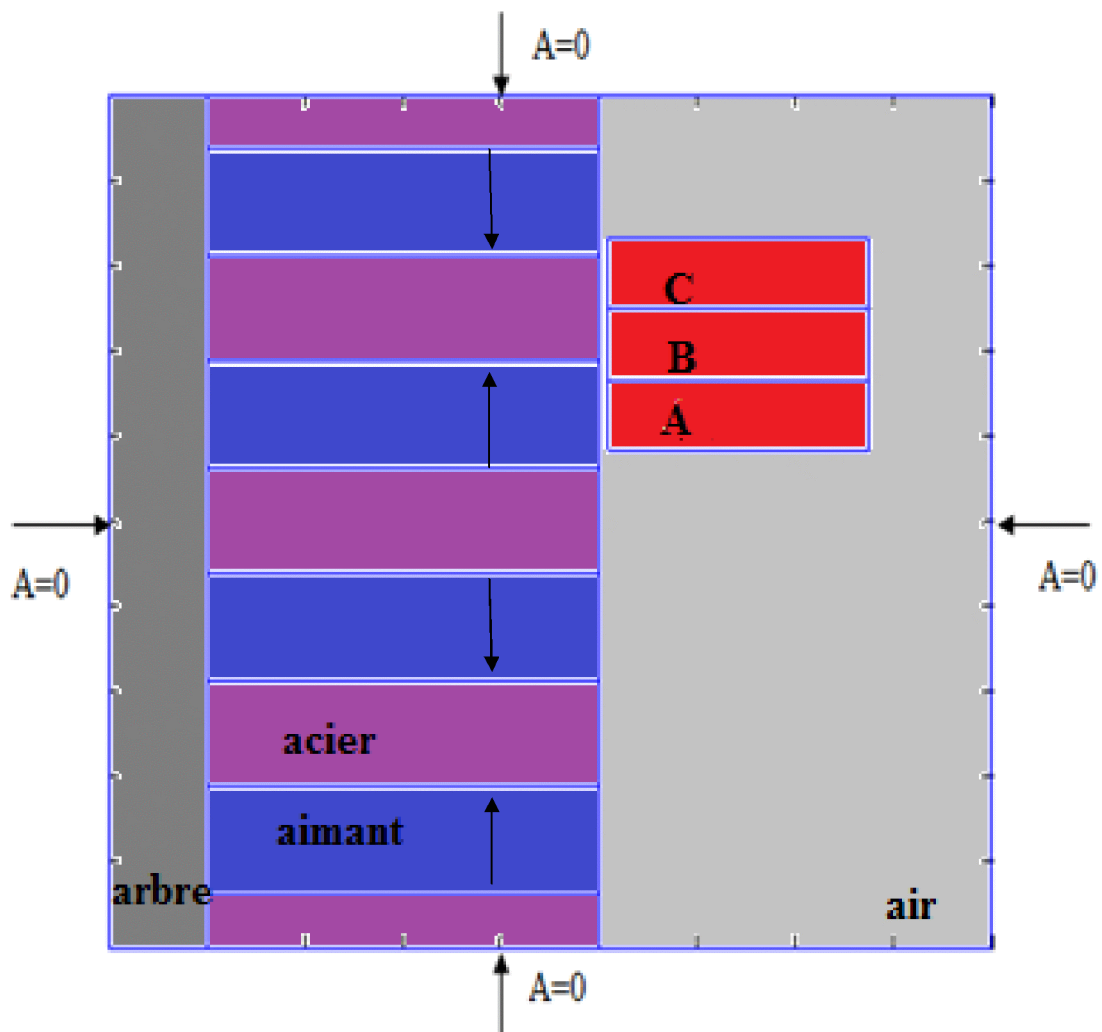


Figure (VI.3) : Domaine de résolution et conditions aux limites.

VI.4 Maillage du domaine de résolution

Le maillage éléments finis du domaine de résolution en éléments triangulaires de premier ordre est illustré par la figure (VI.4) :

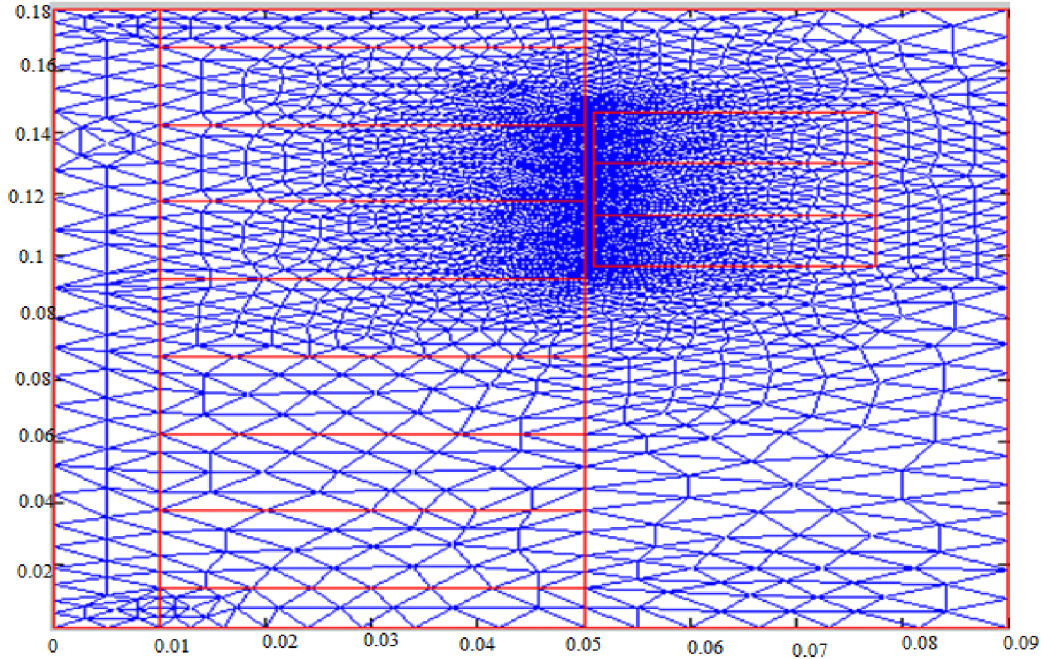


Figure (VI.4) : maillage élément finis du domaine de résolution.

VI.5 Equation de modélisation

Chaque région du domaine à étudier est régie par une équation aux dérivées partielles :

$$\left. \begin{aligned}
 & 0 && \text{Air} \\
 & 0 && \text{Arbre} \\
 & -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\nu}{r} \left(\frac{\partial r A_\varphi}{\partial r} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu}{r} \left(\frac{\partial r A_\varphi}{\partial z} \right) \right) = -\frac{\sigma}{r} \frac{\partial r A_\varphi}{\partial t} && \text{Acier} \\
 & \frac{1}{\mu_a} \left(\frac{\partial B_{rz}}{\partial r} \right) && \text{Aimant} \\
 & J_s - \frac{\sigma}{r} \frac{\partial r A_\varphi}{\partial t} && \text{Babine}
 \end{aligned} \right\} \quad \text{VI.1}$$

VI.6 Analyse de l'état magnétique de la machine

VI.6.1 Bobine alimentées

Dans cette simulation nous allons faire Une analyse de l'état magnétique de la machine lorsque les conditions suivantes sont considérées : Absence de déplacement et Bobine alimentées sans aimantation. Les composantes radial et axial de l'induction magnétique B_r et B_z en fonction des coordonnées axiales oz sont exploitées pour différentes position dans l'entrefer .Les résultats sont représentés par les figures (VI.5) et (VI.6).

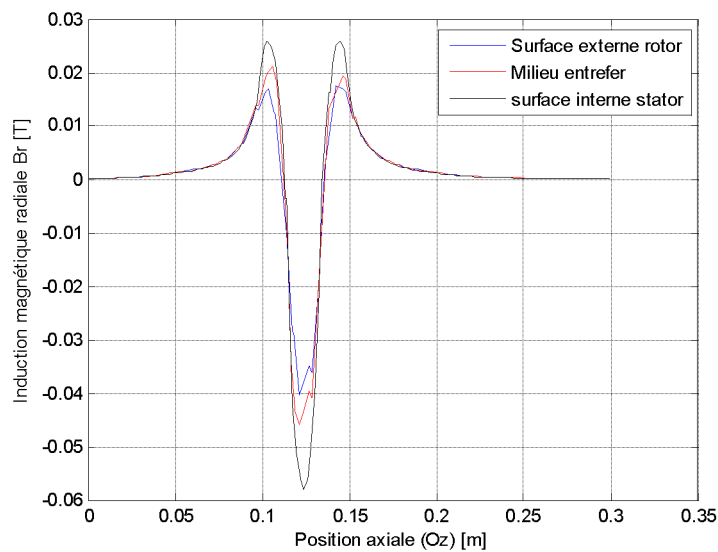


Figure (VI.5) : Induction magnétique radiale en fonction de la position.

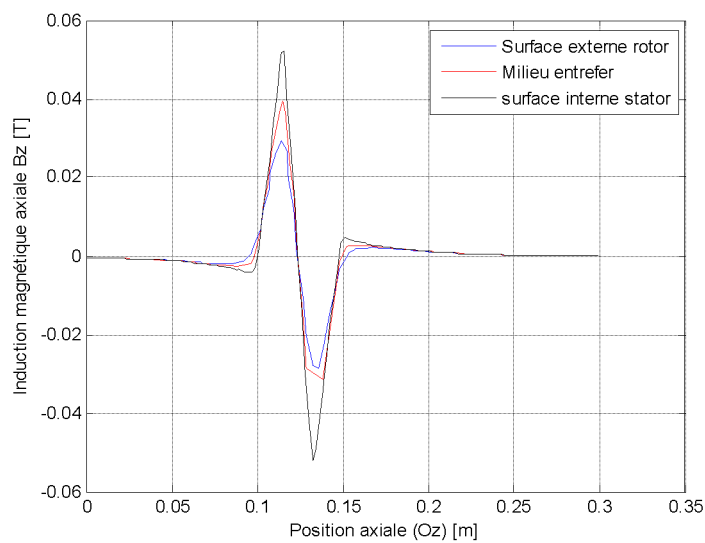


Figure (VI.6) : Induction magnétique axiale en fonction de la position.

VI.6.2 Bobines non alimentées et présence d'aimantation

Pour cette simulation on tient compte de l'aimantation, et les bobines ne sont pas alimentées. Les résultats sont représentés par les figures (VI.7) et (VI.8).

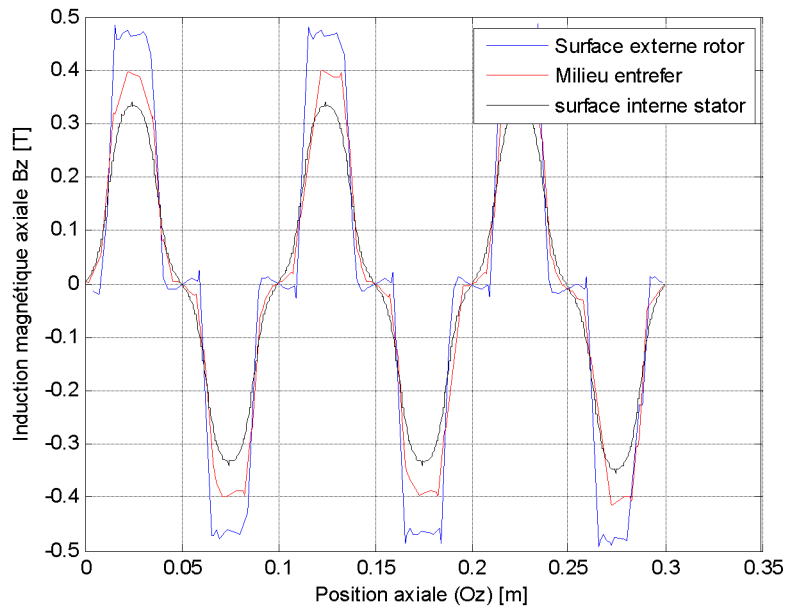


Figure (VI.7) : Induction magnétique radiale en fonction de la position.

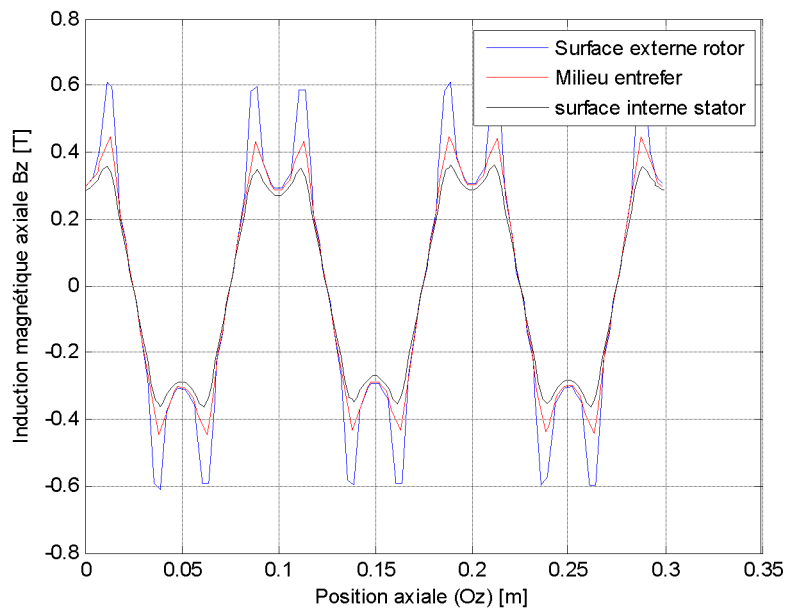


Figure (VI.8) : Induction magnétique axial en fonction de la position.

VI.6.3 Alimentation des bobines avec présence d'aimantation

Pour cette simulation on alimente les bobines et en tient compte de l'aimantation, Les résultats obtenus sont donnés par les figures (VI.9) et (VI.10) :

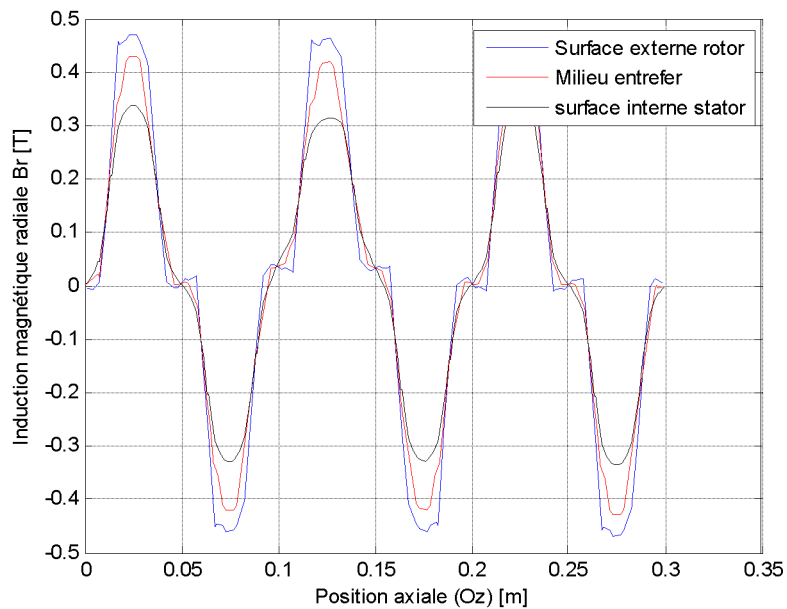


Figure (VI.9) : Induction magnétique radial en fonction de la position.

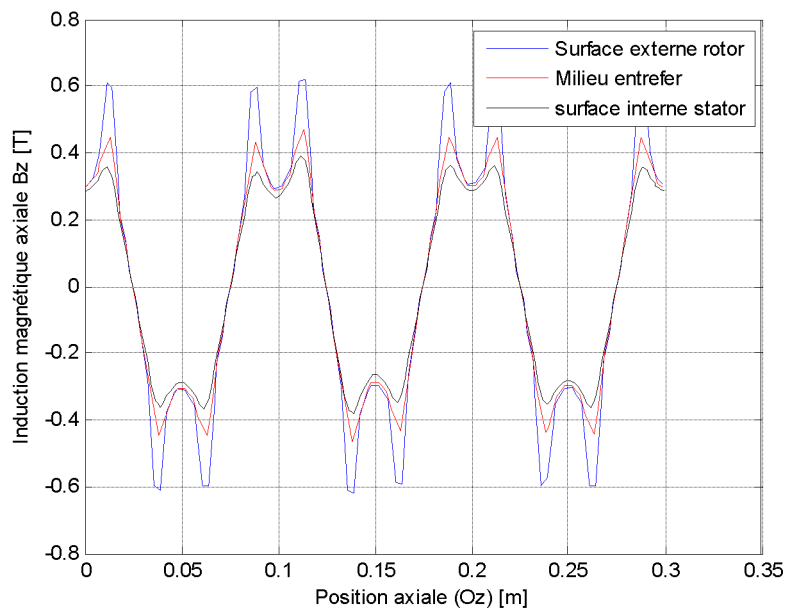


Figure (VI.10) : Induction magnétique axial en fonction de la position.

VI.6.4 Influence de l'entrefer sur les inductions B_r et B_z

Pour avoir l'influence de l'entrefer sur les allures des inductions magnétique radial et axial (B_r et B_z), nous avons effectué un test pour deux valeurs de ce dernier $e=2.5\text{mm}$, et $e=5\text{mm}$.

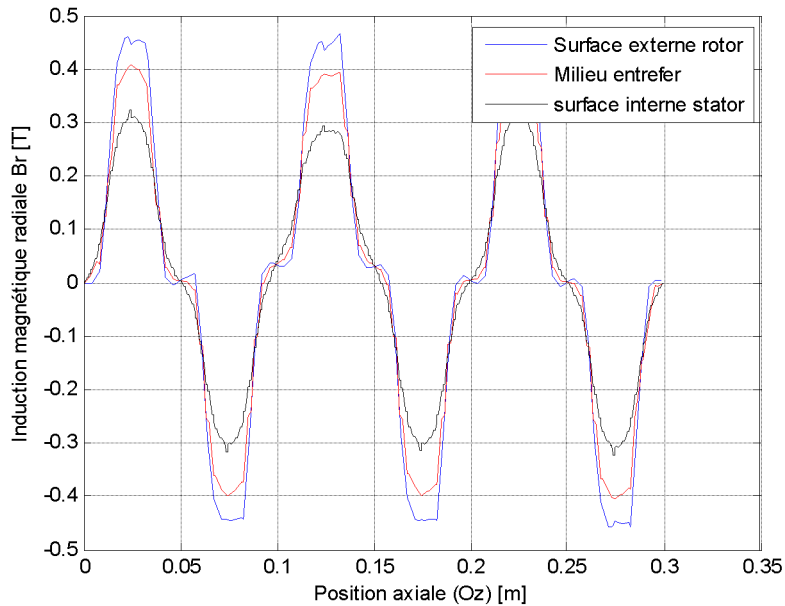


Figure (VI.11) : Induction magnétique radial en fonction de la position pour $e=5\text{mm}$.

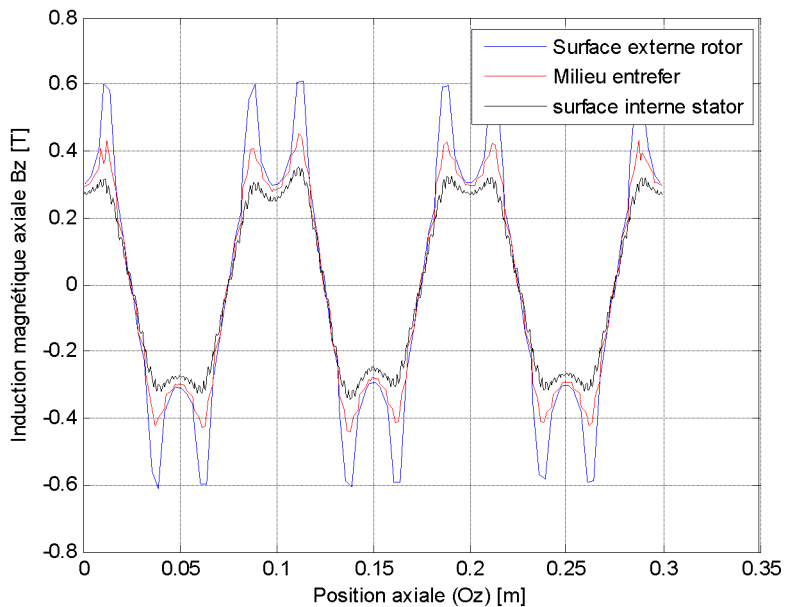


Figure (VI.12) : Induction magnétique axial en fonction de la position pour $e=5\text{mm}$.

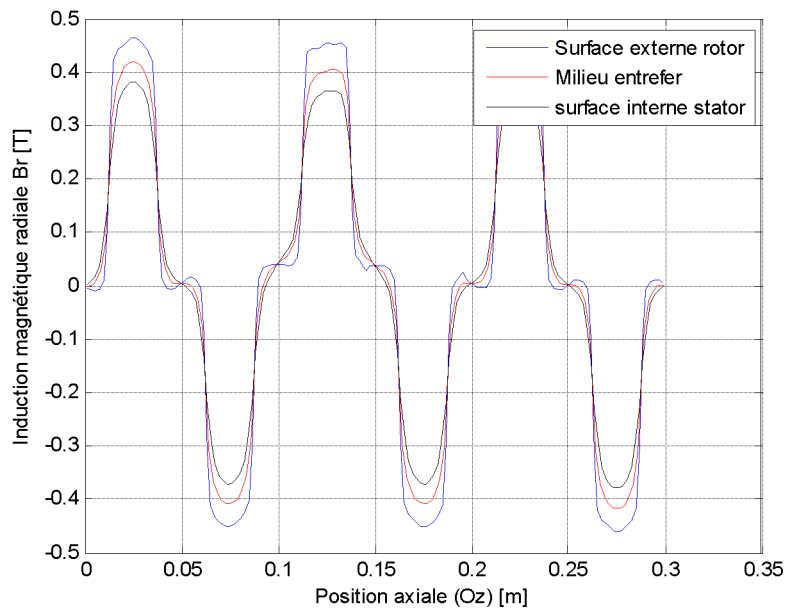


Figure (VL.13) : Induction magnétique radiale en fonction de la position pour $e=2.5\text{mm}$

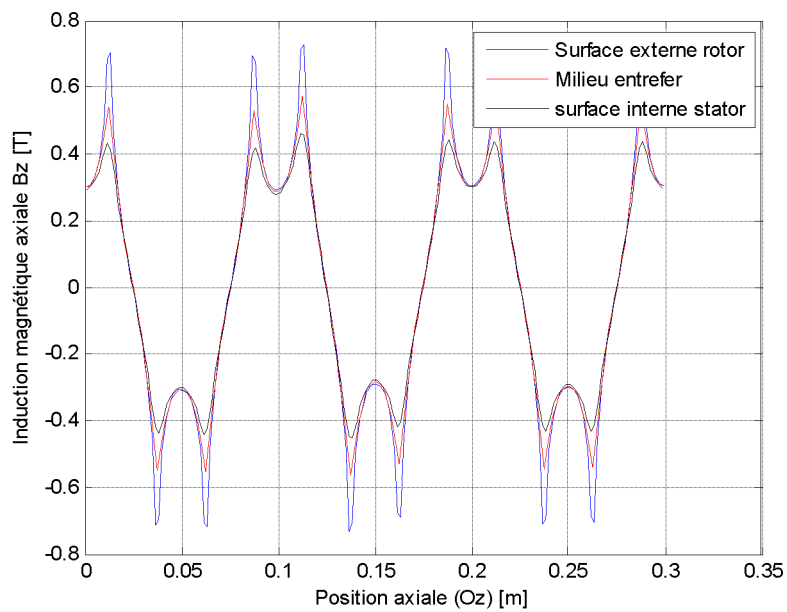


Figure (VL.14) : Induction magnétique axiale en fonction de la position pour $e=2.5\text{mm}$.

*

VI.7 Calcul des inductances propre et mutuelles des bobines

Pour calculer les inductances propres et mutuelles des enroulements, une seule bobine est alimentée à la fois. En alimentant les autres bobines alternativement selon le même principe, on obtient finalement la matrice inductance des phases A-B-C. A partir des relations V-14 et V-15, on exprime la formule permettant de déterminer les inductances propres et mutuelles et ce à chaque position des bobines :

$$L_{ij} = \frac{2W_{mag}^j}{I_i^2} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad \text{VI.1}$$

$$i = a, b, c$$

$$j = a, b, c$$

Les résultats obtenus sont présentés par les figures (VI.15) et (VI.16) La matrice inductance est approximativement par les valeurs suivantes :

$$L_{ij} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13.5 & 0.25 & 0.01 \\ 0.25 & 13 & 0.22 \\ 0.01 & 0.22 & 13.5 \end{bmatrix} [mH]$$

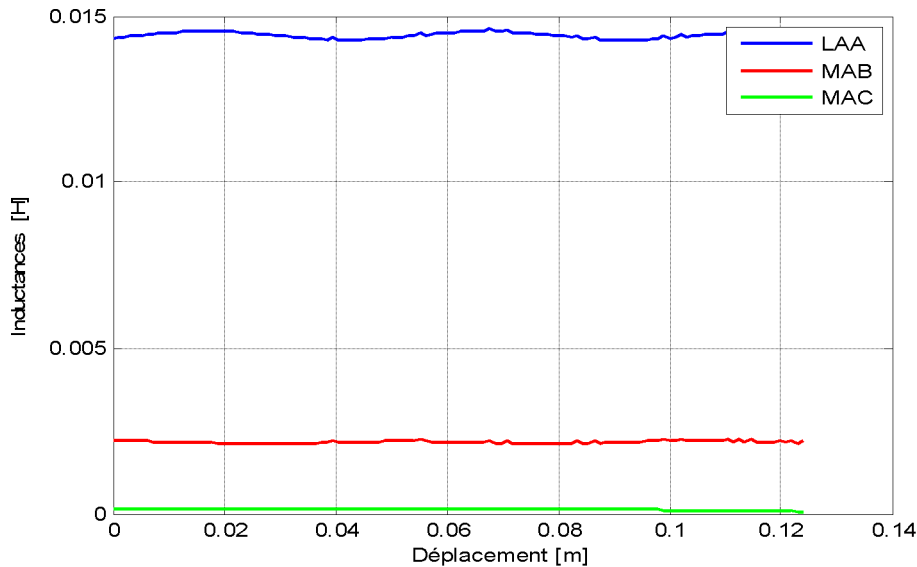


Figure (VI.15) : Les inductances lorsque la phase A alimenté ou la phase C (symétriquement).

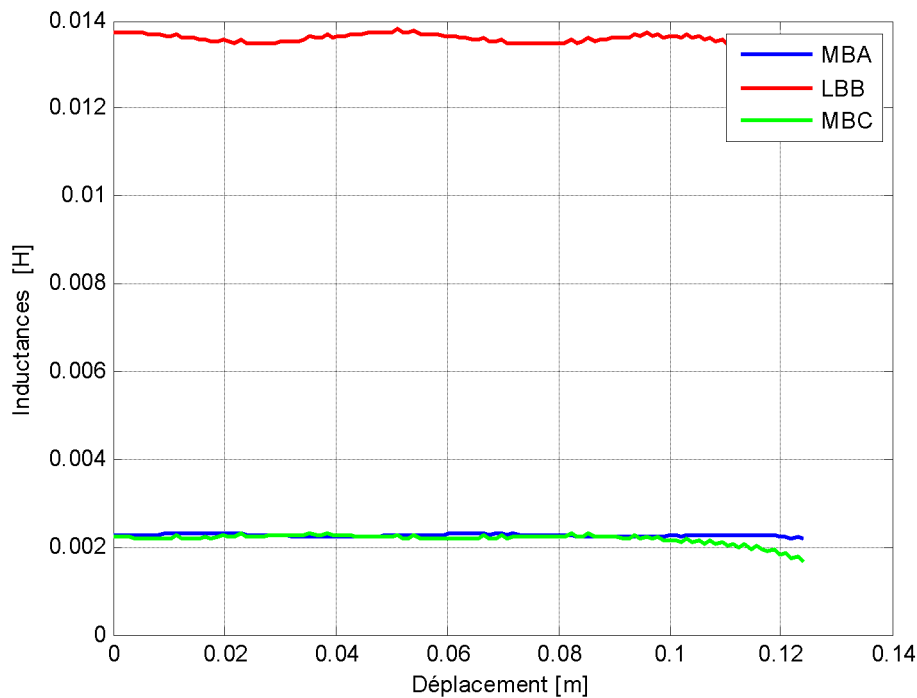


Figure (VI.16) : Les inductances lorsque la phase B alimenté.

VI.8 Calcul des grandeurs électromagnétiques

La résolution par éléments finis du modèle de la machine linéaire est conduite en alimentant uniquement la phase centrale B en considérant les aimants permanents. Ainsi pour chaque pas de déplacement fixé à 1mm le maillage du dispositif donné par la figure (VI.17) montre la bande géométrique utilisée pour la simulation du mouvement. Le maillage présente 9724 nœuds et 19305 éléments.

Les composantes axiales et radiales de induction magnétique et de la force magnétique calculée par la formule de Lorentz sont obtenus et représentées sur les figures VI 18-19 et VI 20-21. Les flux magnétiques traversant les bobines inductrices sont données par la figure VI.22 .

La partie réelle et imaginaire du potentielle vecteur magnétiques sont représentées sur les figures (VI.23-24) et les inductions magnétiques axial et radial dans les figures VI.25-26.

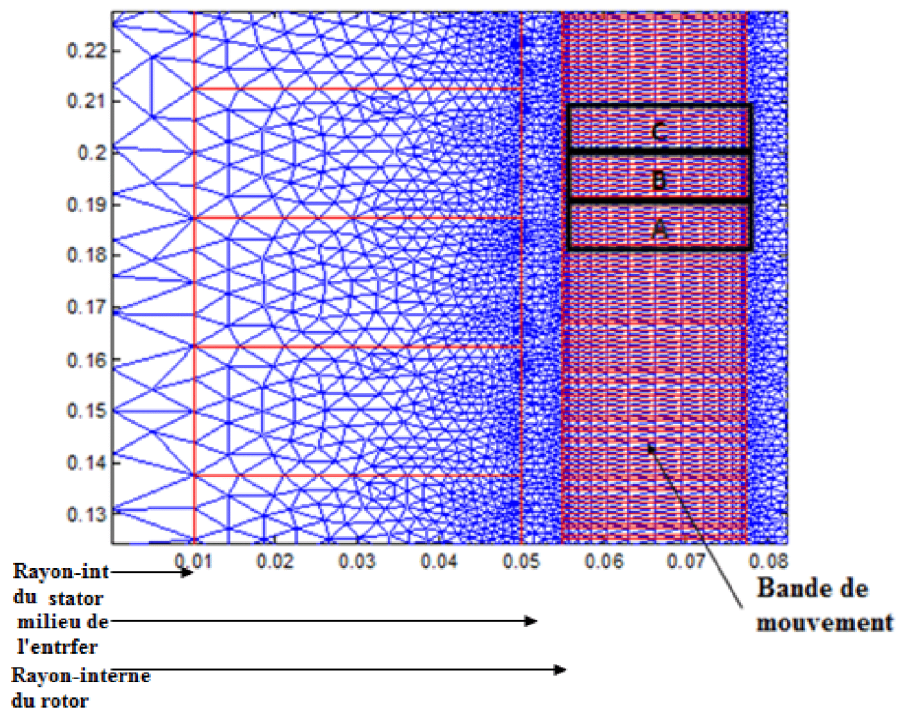


Figure (VI.17) : le maillage du domaine avec la bande de mouvement.

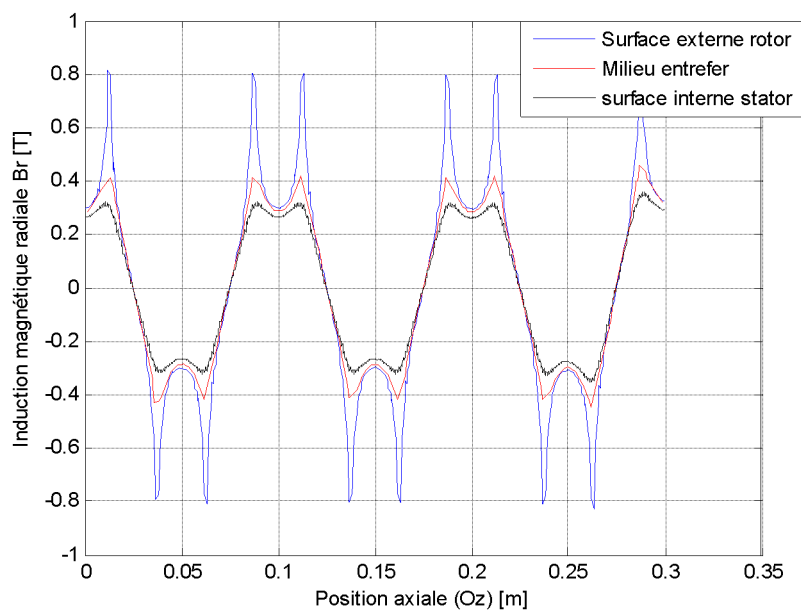


Figure (VI.18) : Induction magnétique radial en fonction de la position.

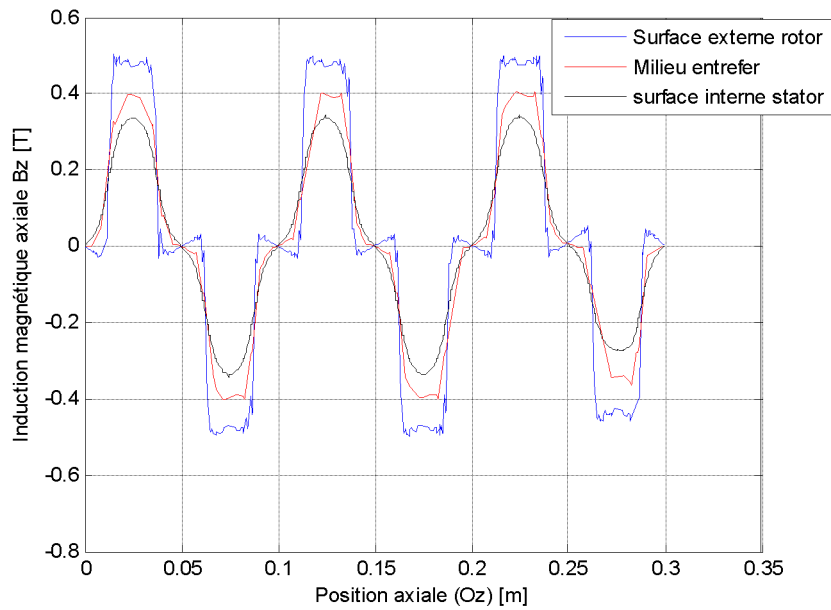


Figure (VI.19) : Induction magnétique axial en fonction de la position.

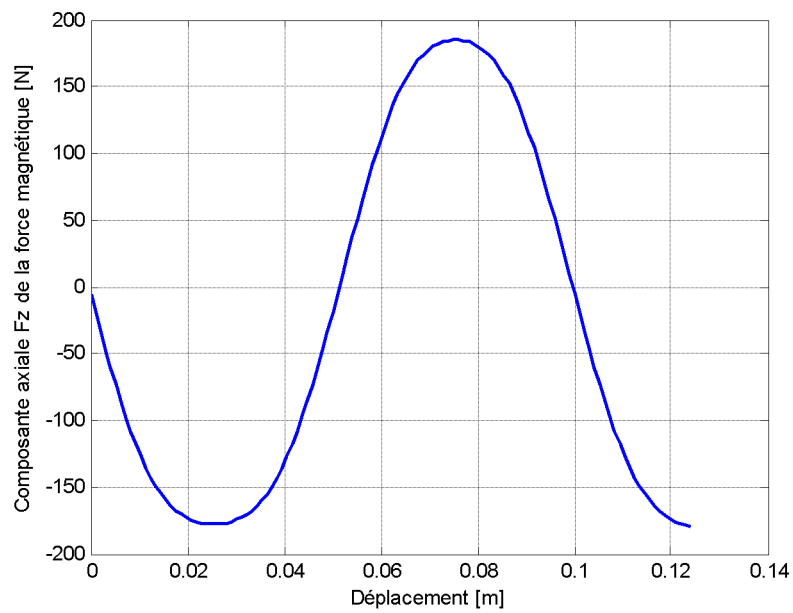


Figure (VI.20) : La force de Lorentz radial.

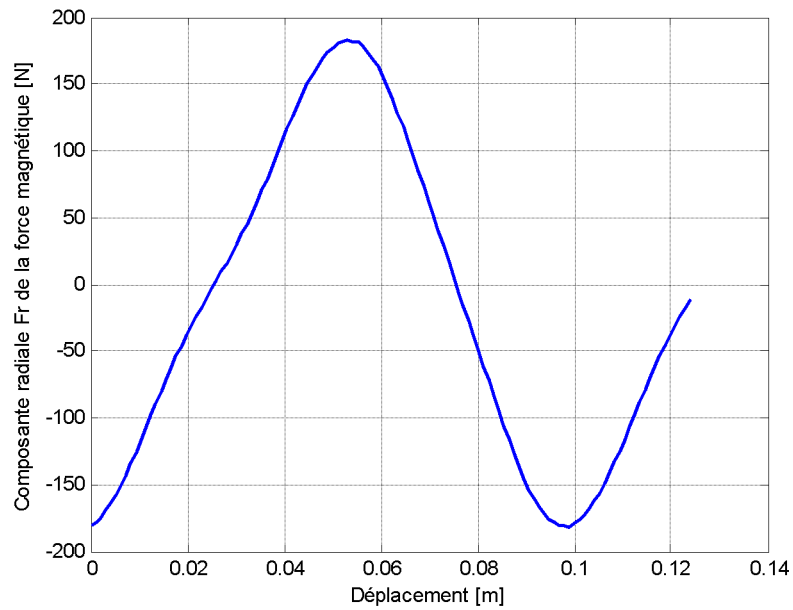


Figure (VI.21) : La force de Lorentz axial.

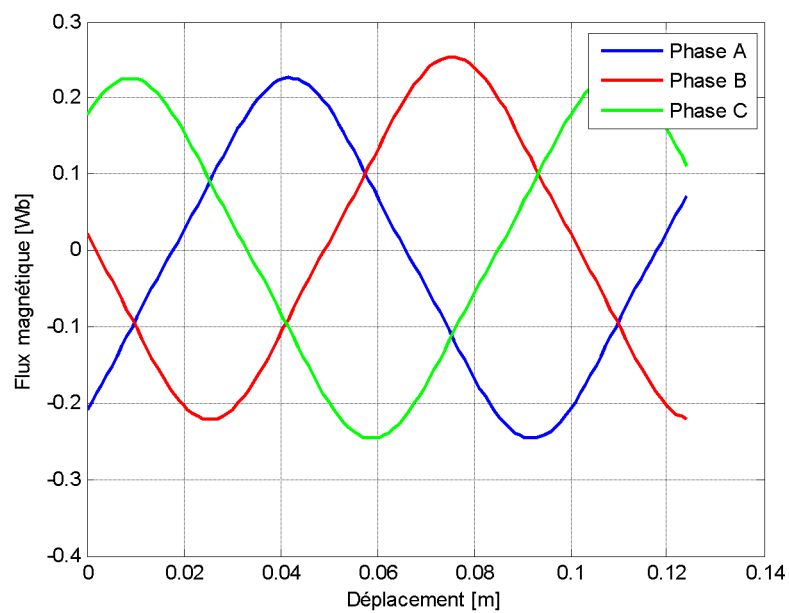


Figure (VI.22) : Les flux magnétiques

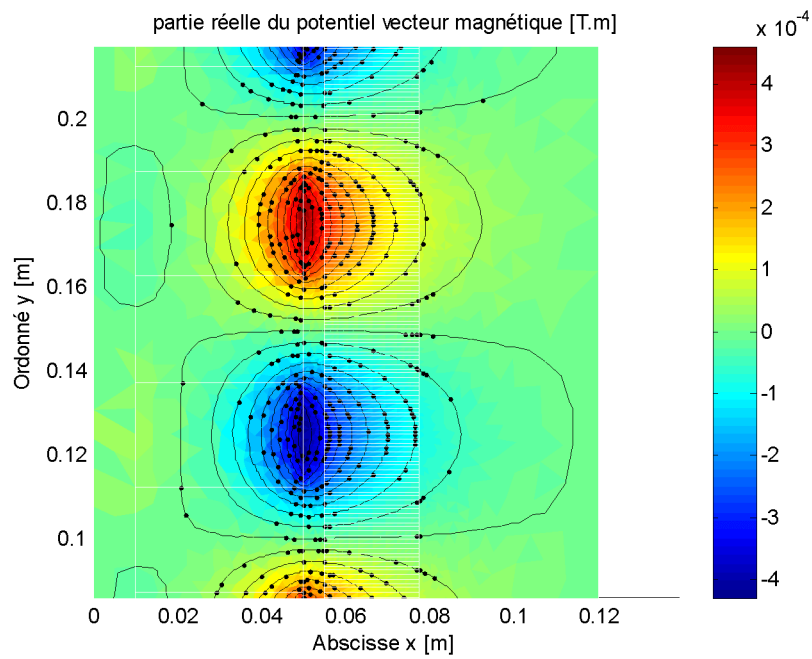


Figure (VI.23) : Partie réelle du potentiel vecteur magnétique.

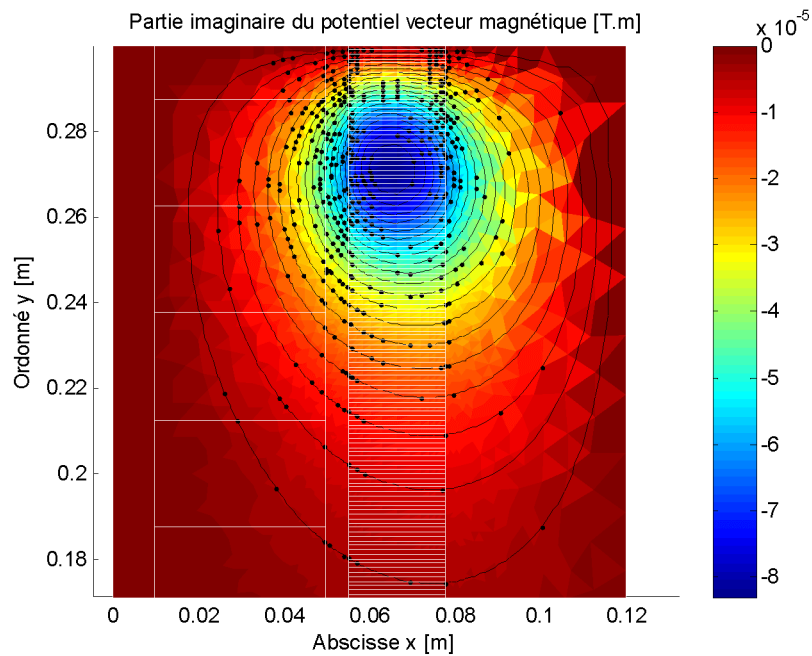


Figure (VI.24) : Partie imaginaire du potentiel vecteur magnétique.

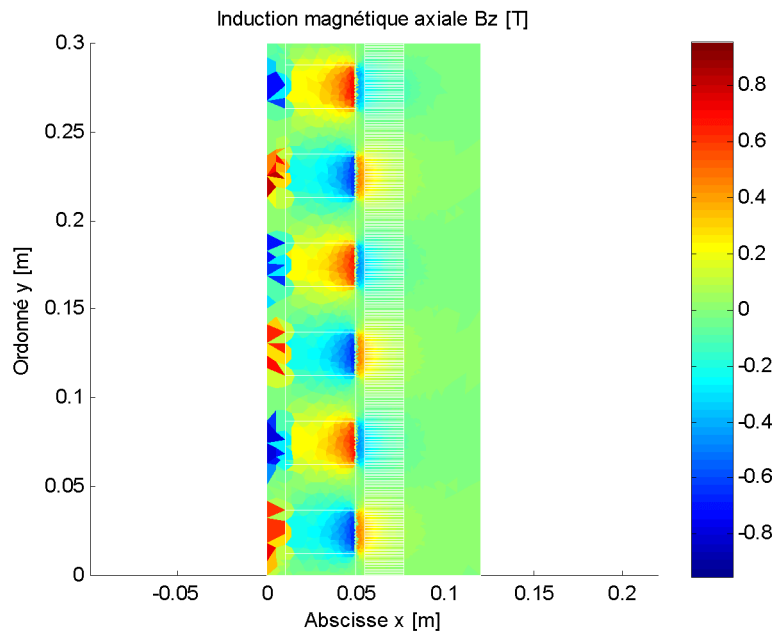


Figure (VI.25) : Induction magnétique axiale.

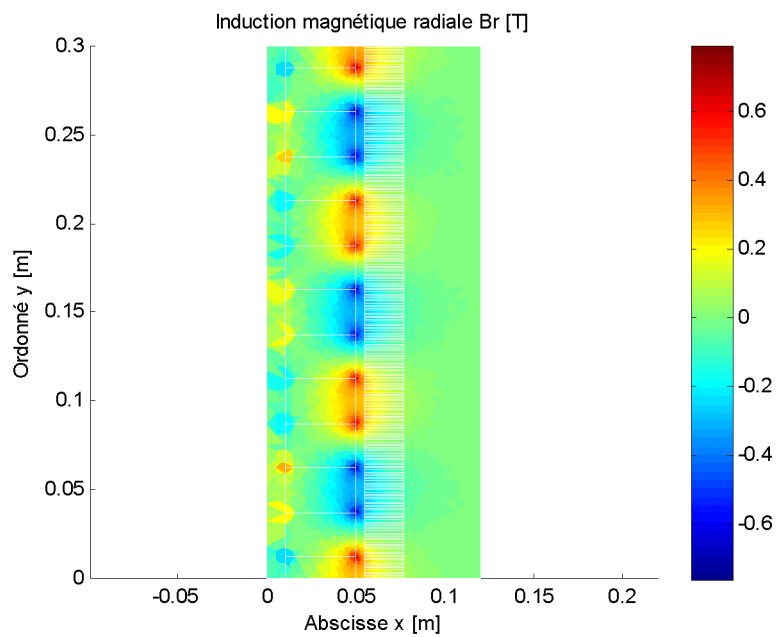


Figure (VI.26) : Induction magnétique radiale.

En alimentant les trois phases et on tenon compte de laimentations , on obtiens les résultats suivantes :

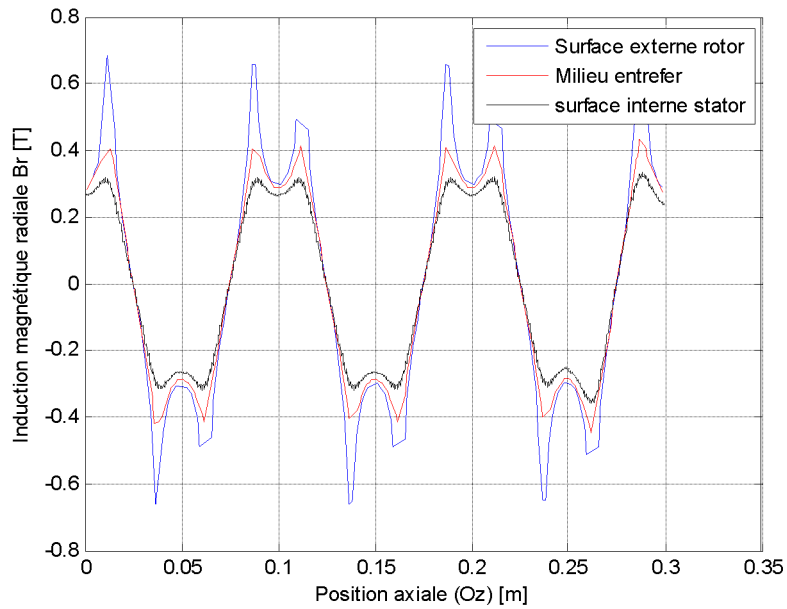


Figure (VI.27) : Induction magnétique radial en fonction de la position.

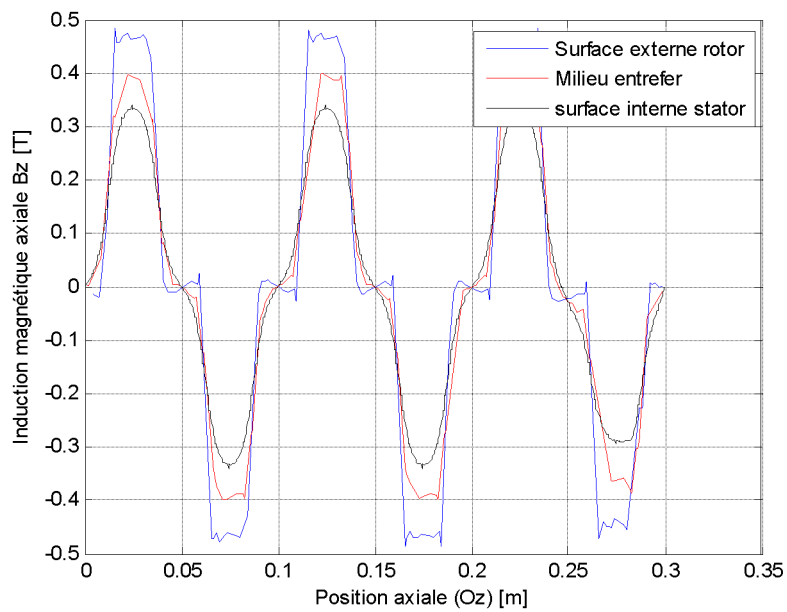


Figure (VI.28) : Induction magnétique axial en fonction de la position.

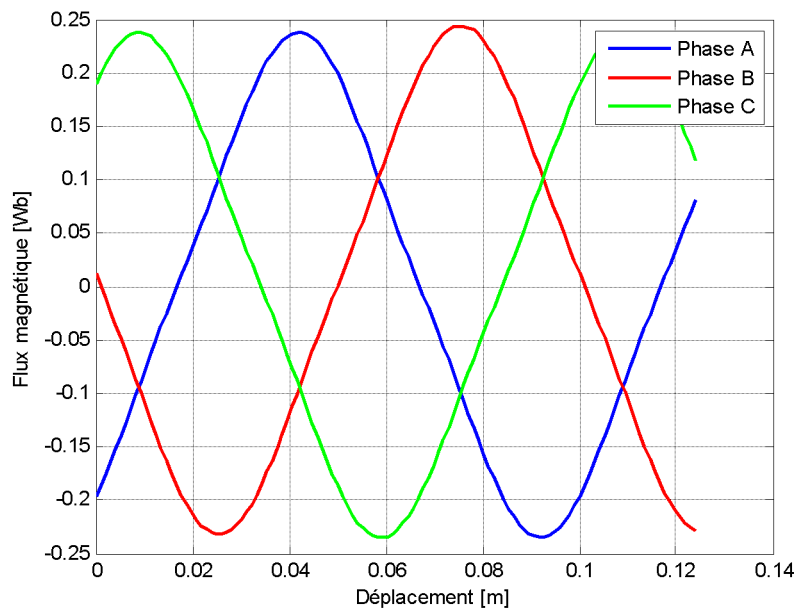


Figure (VI.29) : Les flux magnétiques.

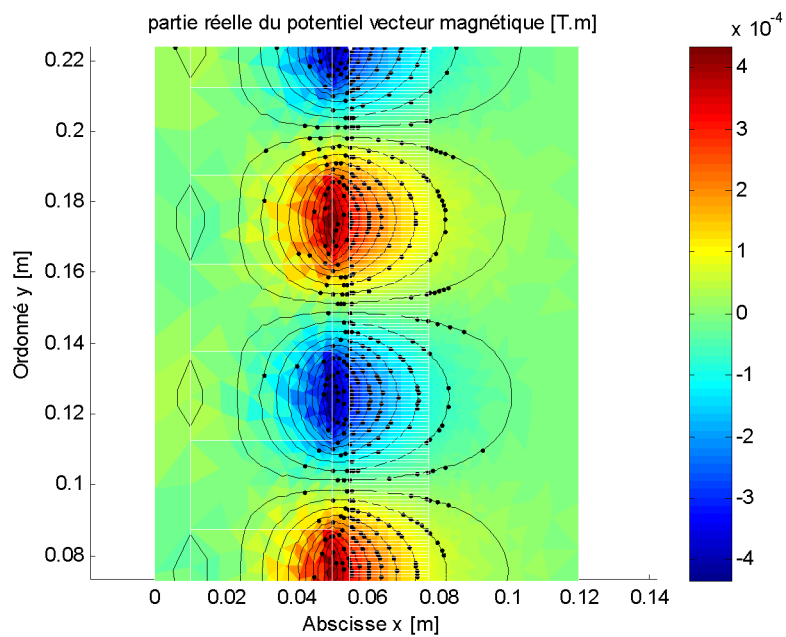


Figure (VI.30) : Partie réelle du potentiel vecteur magnétique.

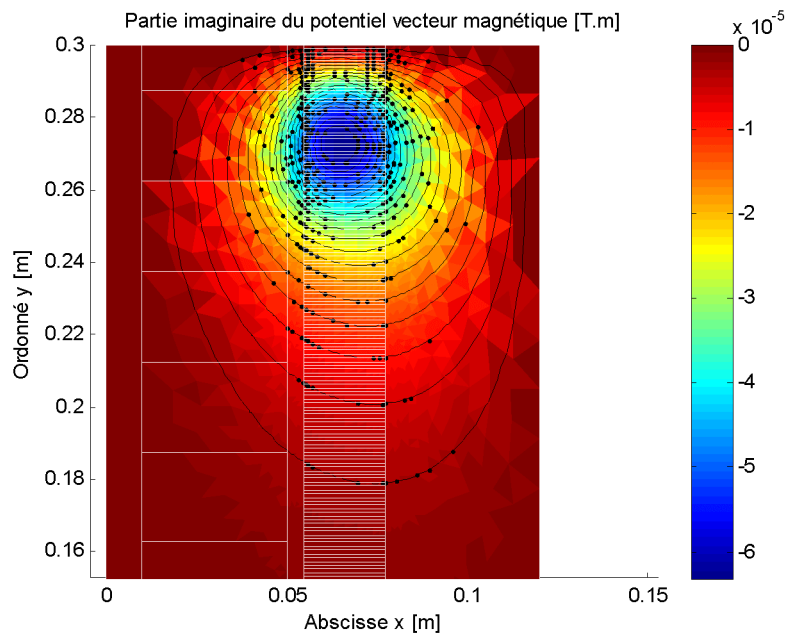


Figure (VI.31) : Partie imaginaire du potentiel vecteur magnétique.

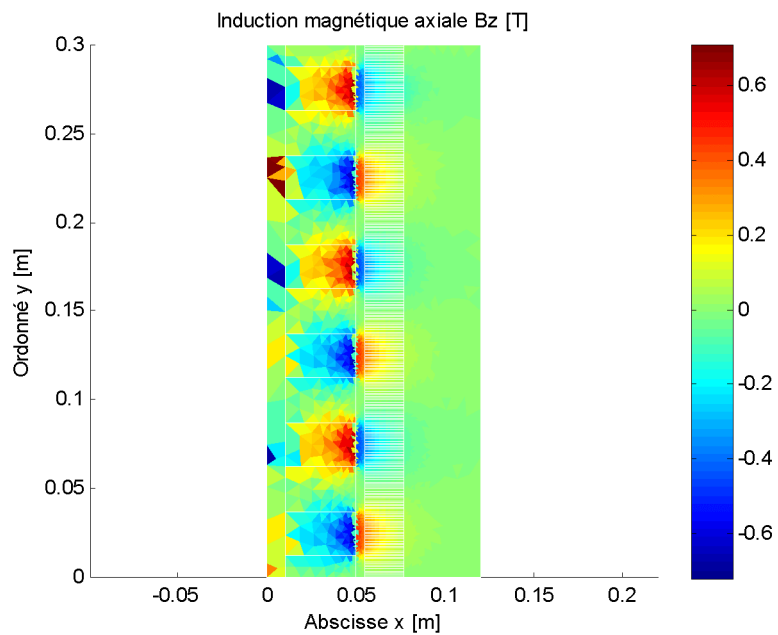


Figure (VI.32) : Induction magnétique axiale.

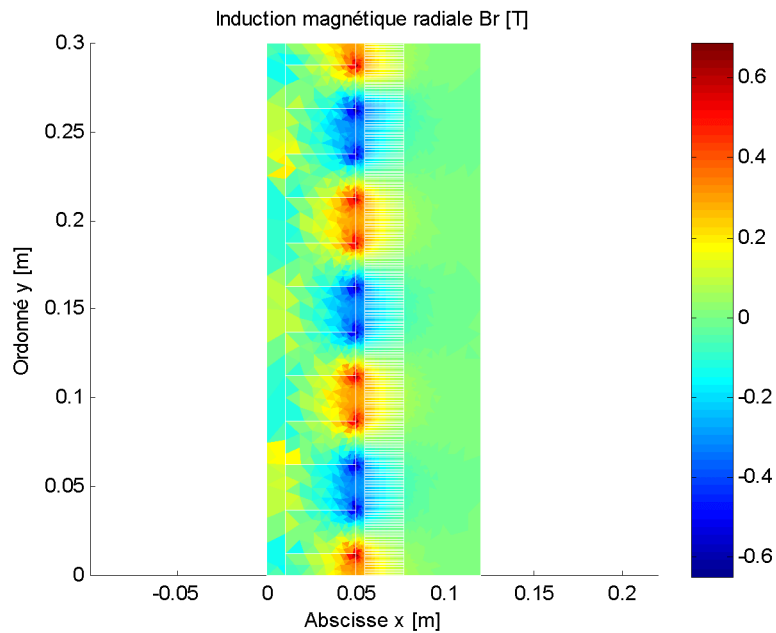


Figure (VI.33) : induction magnétique radial.

VI.9 Calcul de la force électromotrice (FEM)

L'expression de la force électromotrice (FEM) maximal d'un enroulement est donnée par l'équation (VI.2) suivante :

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Phi}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} \quad \text{VI.2}$$

Sachant que : $\Phi = \phi_{max} \sin\left(\pi \cdot \frac{z}{\tau}\right)$ VI.3

$$E = -\left(\frac{\pi}{\tau}\right) \phi_{max} \cos\left(\pi \cdot \frac{z}{\tau}\right) \frac{dz}{dt} \quad \text{VI.4}$$

$$E_{max} = \phi_{max} \frac{\pi}{\tau} \dot{z} \quad \text{VI.5}$$

Avec :

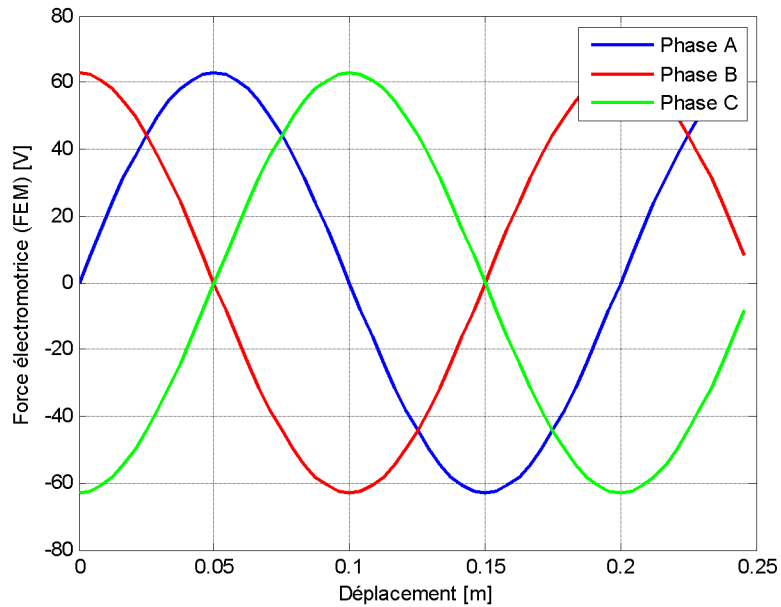
z : déplacement (m).

\dot{z} : La vitesse (m/s).

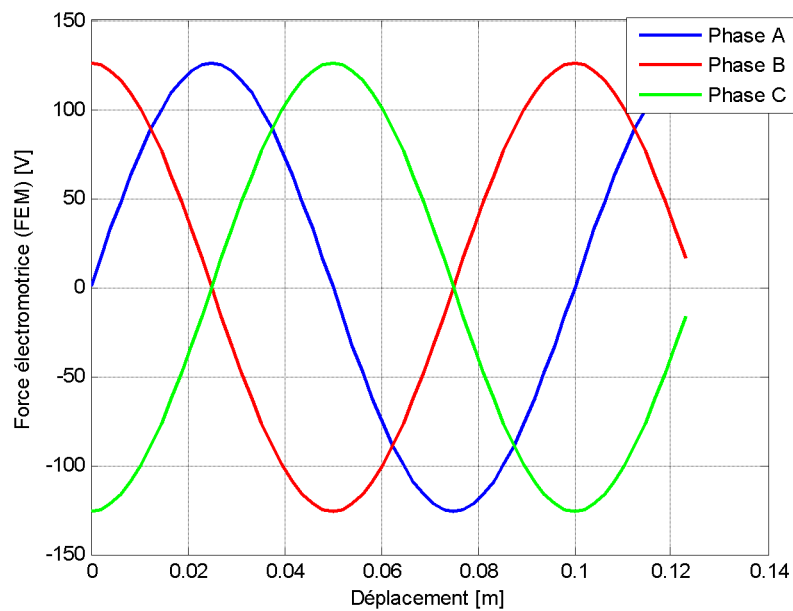
τ : Hauteur d'un aimant plus la hauteur d'acier.

ϕ_{max} : Flux maximum pour un enroulement.

Les résultats obtenus pour deux vitesses $v=0.5\text{m/s}$ et $v=1\text{m/s}$ sont présentés par les figures (VI.34) et (VI.35) respectivement:



Figure(VI.34) : La force électromotrice pour $v=0.5\text{m/s}$.



Figure(VI.35) : La force électromotrice pour $v=1\text{m/s}$.

VI.10 Interprétation des résultats

En comparant les allures des inductions magnétiques axial et radial B_r et B_z dans les trois cas : bobines alimenté seule figures (IV 5-6), présence d'aimantation et bobines non alimenté figures (IV 7-8) et présence d'aimantation et alimentation des bobines figures (IV 9-10), on constate que le flux magnétique de l'aimant est le plus dominant par rapport aux flux crée par les bobines , donc on peut dire que les aimants jouent un rôle très important dans les machines linéaires.

Les figures (VI 11-12-13-14), montrent l'influence de l'épaisseur de l'entrefer sur la distribution des inductions magnétique axial et radial B_r et B_z le long de l'entrefer. Un entrefer important entraine une diminution du flux d'induction magnétique traduisant aux enroulements .Les allures paraissent plus lisses pour des entrefers faibles à cause de la diminution de l'effet de l'induction d'un milieu à un autre.

La figure (VI 22), montre que la variation du flux est sinusoïdale.La valeur réelle donnée dans la référence [2] du flux est obtenue par conséquence en multipliant la valeur obtenue par 8.

D'après les figures (VI.20) (VI.21), on constate que la force de Lorentz axial et un modèle semblable à celui du radial. La valeur de la force est de 160N.

Les résultats obtenus dans les figures (VI 15- 16) montrent que les inductances varient entre 12mH et 13.5mH.

Les figures (VI.34) et (VI.35), représentent les forces électromotrices au niveau des enroulements de la machine électrique linéaire tubulaire pour une vitesse de 0.5m/s et 1 m/s .Ces FEM ont une forme sinusoïdal .En comparants ces FEM, on voit bien que plus que la vitesse est grande plus que la FEM induite est plus importante.

VI.11 Conclusion

Ce travail a été principalement consacré à l'évaluation de la force électromotrice fem induite par la génératrice linéaire tubulaire par la méthode des éléments finis.

Le but de l'étude est d'étudier aussi l'état magnétique de la machine et le calcul des grandeurs électromagnétique tel que la force de Lorentz, les flux magnétique et les inductances propre et mutuelles des bobines pour chaque pas de déplacement de la partie en mouvement.

Conclusion et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Après avoir présentées sommairement un état de l'art sur les différentes énergies primaires renouvelables exploitable pour la production de l'énergie électrique, notre attention s'est particulièrement portée sur l'énergie disponible en mer. L'exploitation de l'énergie des mers utilise des générateurs rotatifs dans le cas ou on des courants marins (houlogénérateurs) ou le vent (éoliennes offshore). Les machines linéaires à aimants permanents tubulaires ou plane sont réservées à l'exploitation de l'énergie issue du mouvement des vagues.

Dans l'optique de l'exploitation de l'énergie des vagues, l'objectif assigné consiste en la modélisation électromagnétique d'une machine électrique tubulaire. A cet effet le modèle électromagnétique développé a été résolu en utilisant la méthode des éléments finis implémentée sous environnement Matlab. Le mouvement étant pris en compte en s'appuyant sur la technique de la bande géométrique (affectation de propriétés).

Ainsi, différentes grandeurs sont déterminées pour chaque pas de déplacement, a savoir les profils des inductions magnétiques et des forces magnétiques axiales et radiales calculée à partir de la formule de Lorentz, les flux magnétiques et les inductances obtenus en explicitant les énergies magnétiques. Cette analyse des performances magnétiques est conduite sous différentes conditions de fonctionnement de la machines linéaires : alimentation de bobines seule, aimants seules, aimants et bobines combinés. Les forces électromotrices induites disponibles sur les enroulements en cours du mode générateur sont obtenues pour différentes vitesse de déplacement. Les résultats obtenus sont satisfaisant en comparaisons avec ceux de la littérature scientifique et plus particulièrement avec ceux présentés en référence [2].

Les perspectives envisageables concerneront la prise en compte des matériaux magnétiques, tout en intégrant le couplage électromagnétique-mécanique avec la nécessité de s'appuyait sur une technique de mouvement plus performante.

Bibliographie

[1] **Cyprien NiL Serge ADJOVI**, « Conception et réalisation d'une génératrice électrique utilisant l'énergie houlomotrice », mémoire d'ingénieur de conception, Ecole Polytechnique de THIES, République du Sénégal, 1990.

[2] **N.J.Baker** «Linear Generators for Direct Drive Marine Renewable Energy Converter », thèse de doctorat, Université de Durham, 2003.

[3] **Sébastien Balibar, Sylvain David, Ionel Solomon**, « Comment je vois le monde, Quelles sources d'énergie pour demain ? », <http://www.iea.org>

[4] «Avenir des énergie des vagues », <http://www.emec.org.uk/marine-energy/>

[5] **Marie RUELLAN**. « Méthodologie de dimensionnement d'un système de récupération de l'énergie des vagues », thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, 2007.

[6] **J.Ribeiro, I. Martin** « Developement of a low speed lineair generator for use in in a wave energy convertor », international conference on renewable energies and power quality, (ICREPQ'10), Granada (Spain), 2010.

[7] «Étude méthodologique des impacts environnementaux et socio-économiques des énergies marines renouvelables». Version 2012.

[8] **Judicaël AUBRY, Aurélien BABARIT, Hamid BEN AHMED et Bernard MULTON**, «La récupération de l'énergie de la houle, partie 2, systèmes de récupération et aspect électrique», publié dans revue EEEI, n°59 pp.26-32, 2009.

[9] **C. Abonnel, A. Clément, N. Fichaux, A. Gauthier, H. Majastre , B. Multon, T. Maître, J. Ruer** «Energie de mer», publié par **ECRIN**.

[10] **Sylvain Delencos**, «Les énergies marines», 2011-2012.

[11] **A.M. Jessop, G.S. Nowlan, E. Macey, J.M. Monro Gray et A.D. McCracken**, «L'énergie géothermie », Canada 2007.

[12] **Jean Jacques BEZIAN**, « L'énergie Solaire », 2004.

[13] **Olga Solomatnikova, Ginette Douville, Nancie Carrière, Vincent Vallée, Florian Trudel, Mireille Duchesne, Myjanoue Perron, Robert Gauthier , Alain Gaudreault et François Rouleau**, « Profil des produits forestiers, Technologie de Bioénergies à base de Biomasse forestière», AVRIL 2011.

[14] « Nouvelle de l'énergie des vagues ou des courant marins »,2001

[15] **A.MILOUD** « Contribution à l'étude d'un moteur synchrone linéaire à aimants permanents », mémoire de Magistère, Université de Batna, 2011.

[16] **Ghislain REMY**, « Commande Optimisé d'un Actionneur Linéaire Synchrone pour un axe de Positionnement Rapide », Thèse de Doctorat, soutenu le 17/12/2007, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.

[17] **L.El AMRAOUI**, « Conception Electro mécanique d'une gamme d'actionneurs Linéaires Tubulaires à Réductance Variable », Thèse de Doctorat, soutenu 18/12/2002, Ecole Centrale de Lille, Université des Sciences et Technologiques de Lille, Ecole National d'ingénieurs de Tunis.

[18] **Zaouia Mustapha**, « Modélisation Numérique du couplage Electromagnétique-Mécanique dans les structures Linéaires Tubulaires », Thèse de Doctorat, Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.05 Mai 2013.

[19] **Y.MESSAOUDI**, « Contribution à la modélisation multi-physique des générateurs électriques linéaires », Mémoire de Magistère, Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2012.

[20] **R. Lateb** , « Modélisation des machines asynchrones et synchrones à aimants avec prise en compte des harmoniques d'espace et de temps », Thèse de doctorat d'I.N.P.L, de Nancy (France), octobre. 2006.

[21] **M. Zaouia, N.Benamrouche, A.Djerdir**, « Study and Analysis of an Electromagnetic Energy Recovery Damper (EERD) for Automotive Applications », page 2708-2713, 978-1-4673-0141-1/12/\$26.00 ©2012 IEEE.

[22] **G.Carron de la Mortinais G.Meunier et C.Kieny**. « Calcul des courants de Foucault en trois dimensions par une formulation utilisant le potentiel vecteur magnétique et le potentiel scalaire électrique. » Juillet 1990.

[23] **Hubert Gié** « Electromagnétisme ».LAVOISIER 1995

[24] **P. Lorrain, D.R.Corson**, « champ et ondes électromagnétiques » Armand Collin.Collection, Paris 1979.

[25] **E.TONTI**, « Finite Formulation in the Electromagnetics Field » progress in Electromagnetics Resrch, PIER 32,pp-1-44, 2001.

- [26] **Rachek M'hemed** « Modélisation par éléments finis de système électromagnétique en mouvement de structures tridimensionnelles » Thèse de Doctorat 2007, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [27] **Diche Arezki**, « Développement de transformation pour l'étude des capteurs à courant de Foucault », Mémoire de Magistère.2003
- [28] **OUKACINE Nacima**,« Utilisation des réseaux de neurones pour la reconstitution de défauts en évaluation non destructive », Mémoire de Magistère 2012, université de Tizi-Ouzou, 2012 .
- [29] **Par Jean-Claude SABONNADIÈRE et Jean-Louis Coulomb**, technique de l'ingénieur « calcul des champs électromagnétique » DOC.D3020.
- [30] **AZIZ Ahcene** « Modélisation par éléments finis d'une machine linéaire tubulaire et réalisation de prototype », Mémoire de Master, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [31] **F.Azzouz, B.Bendjima, M.Feliachi and M.E.Latrèche**, « Application of the Macro-Element and Finite element coupling for the behavior analysis of magnetofforming systems », IEEE Transactions on Magnetics Vol.35,No,3,PP,1845,May1999.
- [32] **Bachir Maouche** ,« Etude de développement semi-analytique de l'équation de diffusion électromagnétique avec termes de déplacement dans le cas de dispositifs axisymétrique excité en courant ou en tension », Mémoire de Magister, Université de Bejaia,1996.
- [33] **Vincent Doirat** « contribution de système de contrôles Non destructifs par courant de faculté Application à la caractérisation physique et dimensionnelle de matériaux de l'aéronautique » thèse de doctorat université de Nantes ,2007
- [34] **G.Dhatt, G.Touzot**, « Une présentation de la méthode des éléments finis ».2^{ème} Edition, Maloine, S.A.Paris 1984.
- [35] **Ryma DELIMI** « méthode comparées pour le calcul des forces d'origine électromagnétique. Application aux paliers magnétiques » Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université MentouriConstantine ,2008.
- [36] **Sadowski N. Sadowski, Y. Lefèvre, M. Lajoie-Mazenc, J. P. A. Bastos**, “sur le calcul des forces magnétiques”, J. Phys. III France, pp 859-870, May 1992