Chapitre III : Modèle Numérique d'un moteur synchrone à aimants sinusoïdaux

III.1.Introduction

La méthode des éléments finis (MEF) est de nos jours l'une des méthodes numériques les plus utilisées pour la résolution des équations aux dérivées partielles régissant les phénomènes électromagnétiques dans les machines électriques tournantes [19], et surtout dans notre étude.

L'utilisation de cette méthode conduit à la résolution des systèmes algébriques linéaires creux de grandes dimensions symétriques définis positifs. Le coût généré par la résolution de ces systèmes dépend de leurs tailles, des méthodes de stockage utilisées, ainsi que des méthodes de résolution choisies [19].

Au niveau de ce chapitre. On fait une validation par éléments finis de résultats obtenus par la méthode analytique dans le chapitre précédent par l'utilisation d'outil gratuit de modélisation développé pour calculer les machines synchrones à aimant, appelé FEMM (Finite Elément Method Magnet).

III.2. Présentation d'outil de calcul utilisé

Nous avons défini précédemment la méthode des éléments finis utilisée pour calculer les performances des machines synchrones à aimants permanents. Dans cette partie nous présentons l'outil de calcul utilisé.

Dans ce mémoire, la validation des résultats obtenus par les calculs analytiques est effectuée à l'aide d'un logiciel 2D basé sur la méthode des éléments finis désigné par FEMM (finité Elément Méthode Magnetics)

Comme tous les logiciels employés pour des problèmes d'éléments finis en deux dimensions, ils sont articulés en trois axes appelés « pré-processeur », « processeur », « post- processeur».

Dans le but de pouvoir modifier à notre guise les paramètres de la machine pour voir leur influence. FEMM, ne nous donne pas cette opportunité, par contre, il nous donne la possibilité de le commander par des programmes extérieurs. Nous définirons alors le post et le pré processeur à l'aide du langage LUA, qui est dérivé du langage C++. Le script LUA est une partie de programme directement interprétée par FEMM, Contenant des fonctions propres au logiciel FEMM. Avec ce script nous pouvons aisément de configurer et de piloter FEMM [20].

III.2.1. pré-processeur

Cet élément permet de définir la machine d'études à savoir :

- dessiner la géométrie de la machine avec des arcs ou des segments de droite
- définition du problème à savoir la nature du problème à résoudre (la fréquence, l'unité des grandeurs géométriques, la précision de calcul). nous pouvons également définir la finesse du maillage.
- Introduction des caractéristiques des différentes régions géométriques de la structure (propriétés magnétiques des matériaux)
- Définitions des circuits de la structure. Cette partie nous donne aussi la possibilité d'introduire le nombre de spires dans les bobinages ainsi que la valeur des courants
- Introduction des conditions aux limites
- Introduction des courbes de saturations dans le cas où elle est prise en compte.

III.2.2. le processeur

Cet élément effectue la résolution du problème défini sur chaque élément de maillage en effectuant des itérations jusqu'à atteindre la précision imposée au pré- processeur. En chaque élément, le potentiel vecteur est connu et à partir de là, les autres grandeurs sont déduites.

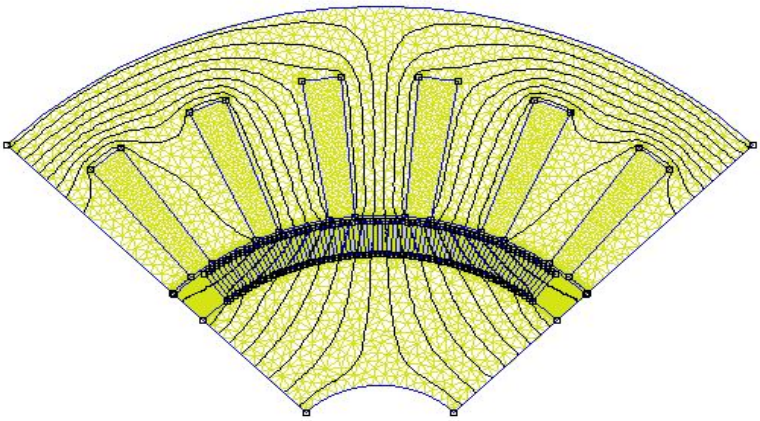
III.2.3. le post processeur

C'est un graphique permettant l'exploitation de la solution du problème. La solution peut être représentée par un tracé de densité ou par des vecteurs s'il s'agit d'une grandeur vectorielle. Un certain nombre de calcul intégral, le long des contours et des aires prédéfinis, est aussi accessible.

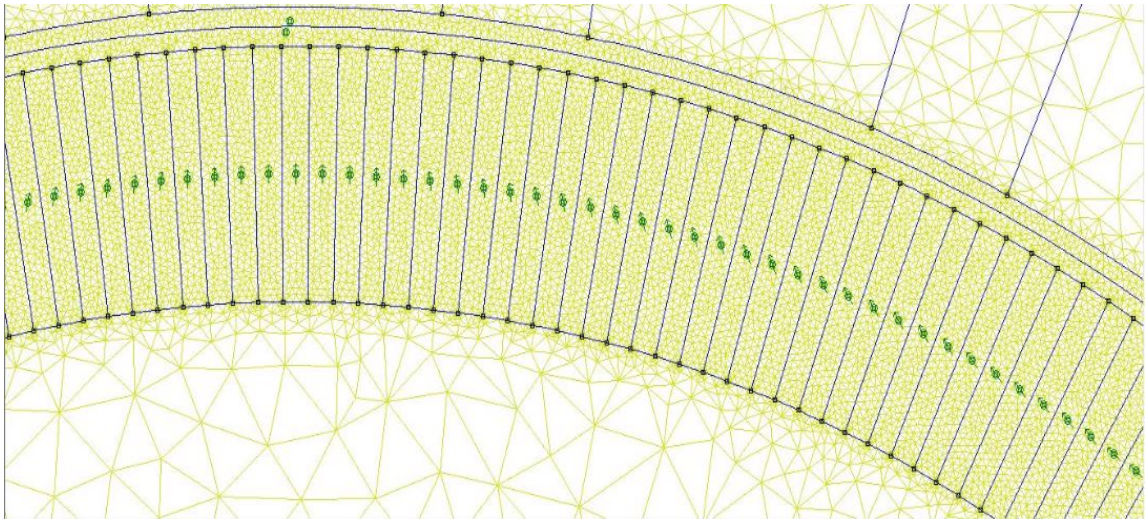
III.3. Validation par éléments finis de résultats obtenus par la méthode analytique

Dans cette partie, les résultats issus du modèle analytique que nous avons développé dans le chapitre II sont confrontés aux résultats obtenus à partir du calcul par éléments finis sur (la figure.III.1) et (la figure.III.2) nous représentons successivement le maillage par éléments finis triangulaires de la structure étudiée et la carte du champ magnétique crée par les aimants dans les deux cas :

- stator lisse
- stator encoché



(a)



(b)

Fig. III. 1: Maillage par éléments finis (a) et zoom de l'entrefer (b)

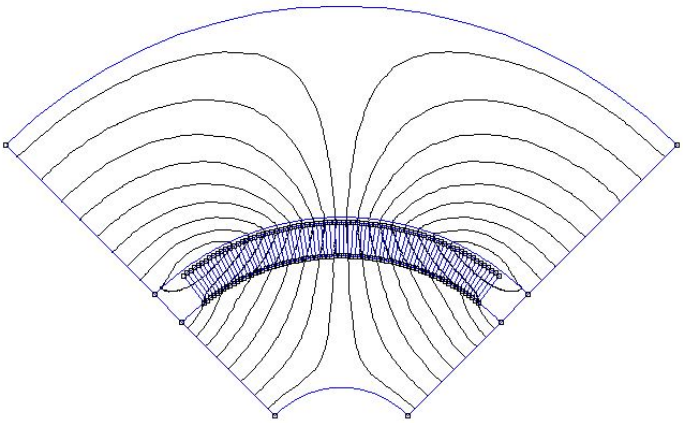


Fig. III. 2. Distributions de la ligne du champ magnétique stator lisse

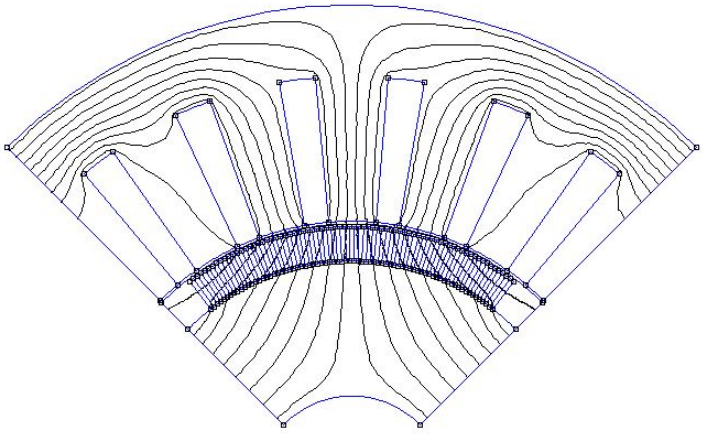


Fig.III.3. Distributions de la ligne du champ magnétique stator encoché

Au niveau des formes d'ondes des inductions radiale et tangentielle pour les deux types de stator (cas lisse et encoche) (la figure.III.3), (la figure.III.4) on observe une bonne concordance sous les mêmes hypothèses.

Les inductions (la figure.III.3) sont obtenues analytiquement en utilisant les inductions avec stator lisse.

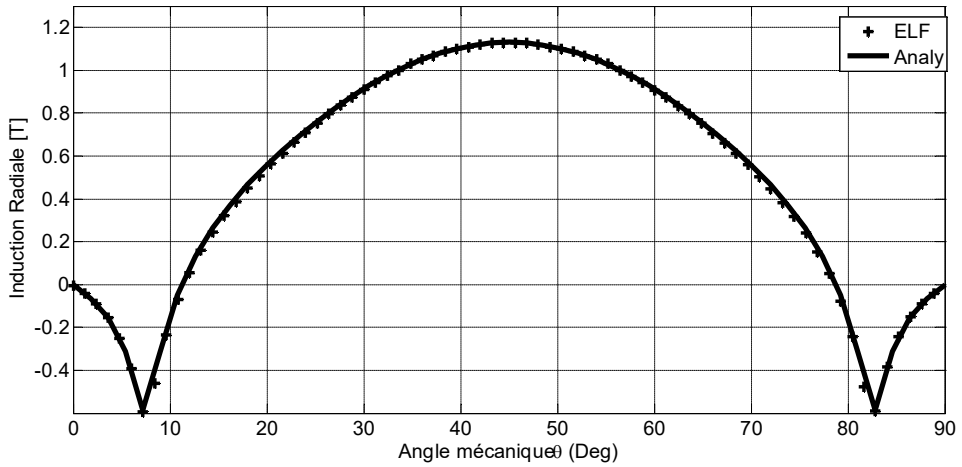


Fig.III.4. a. Composantes Radiale B_r de l'induction avec stator lisse pour$\alpha_p = 5/6$

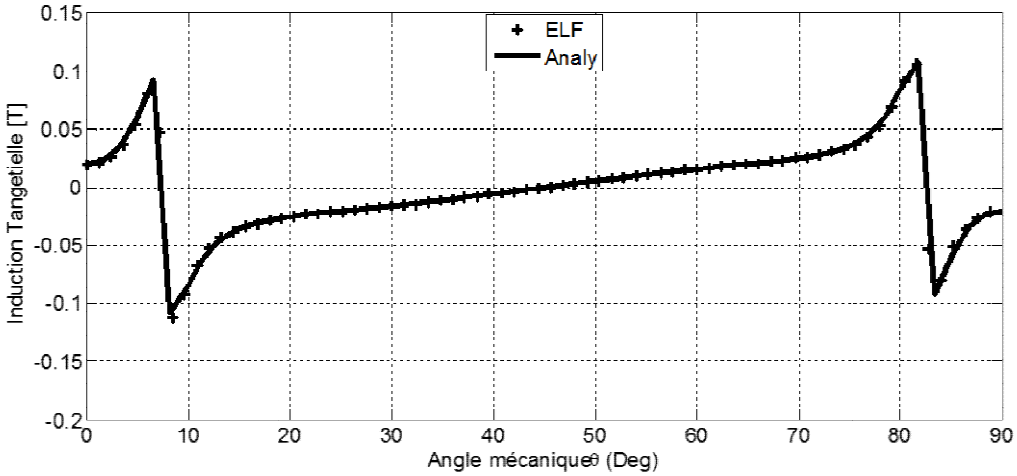


Fig.III.4. b. Composantes tangentielles B_θ de l'induction avec stator lisse pour$\alpha_p = 5/6$

Les inductions (Fig. III. 4 et III. 5) sont obtenues analytiquement en utilisant les inductions avec un stator lisse (Fig. III. 3 a et III. 3) et les perméances relatives réelles et imaginaires. On observe une bonne concordance sous les mêmes hypothèses.

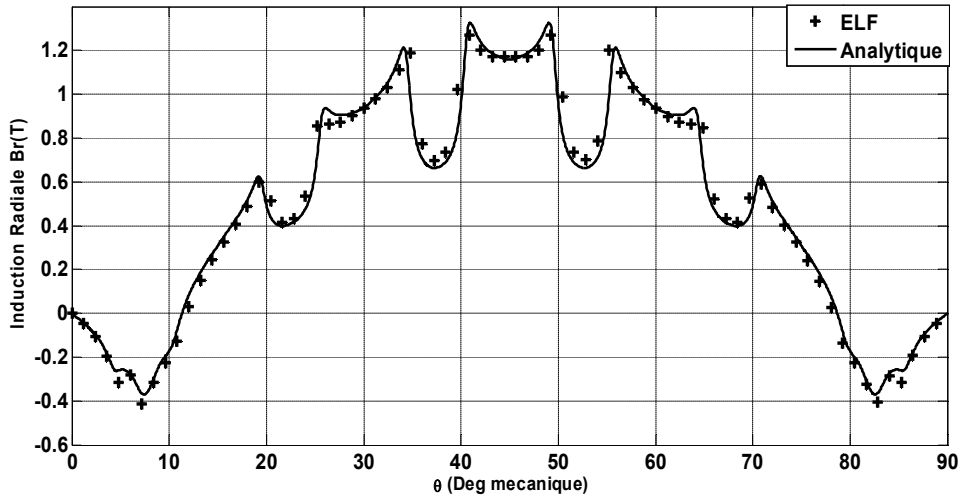


Fig.III.5. a. Composantes Radiale $B_r$de l'induction avec stator encoché pour$\alpha_p = 5/6$

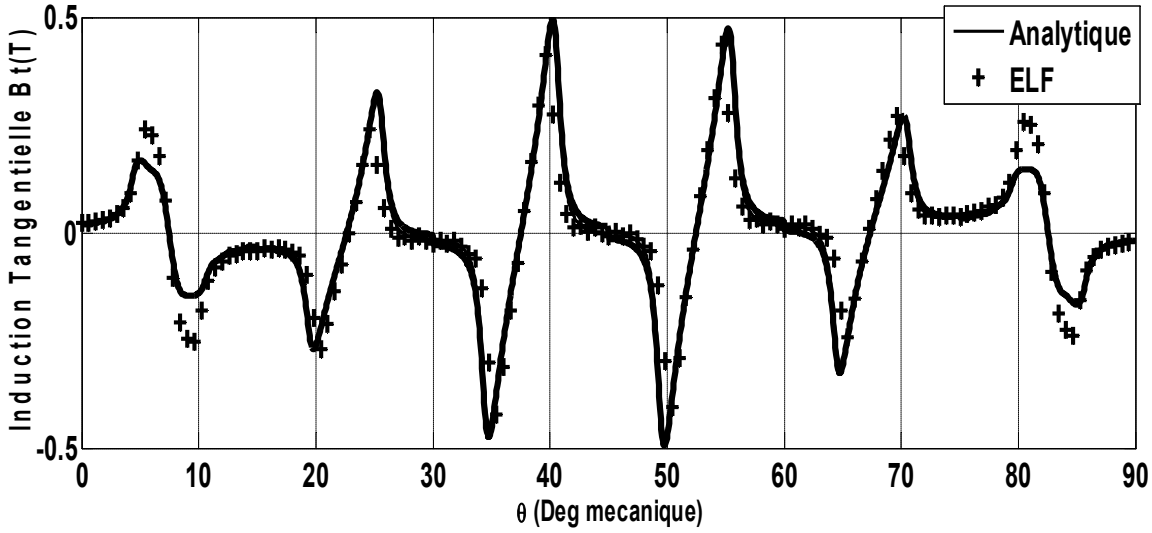


Fig.III.5. b. Composantes tangentielle $B_\theta$de l'induction avec stator encoche pour $\alpha_p = 5/6$

III.4. Influence des paramètres géométriques de la machine

III.4.1. Influence d'épaisseur des aimants

La (Fig.III.6 (a)) et (Fig.III.6 (b)) représente la variation de l'induction radiale et tangentielle crées par l'aimantation sinusoïdale en fonction de l'épaisseur des aimants au niveau de l'entrefer. Elle montre que l'amplitude de l'induction est proportionnelle à l'épaisseur de l'aimant utilisé.

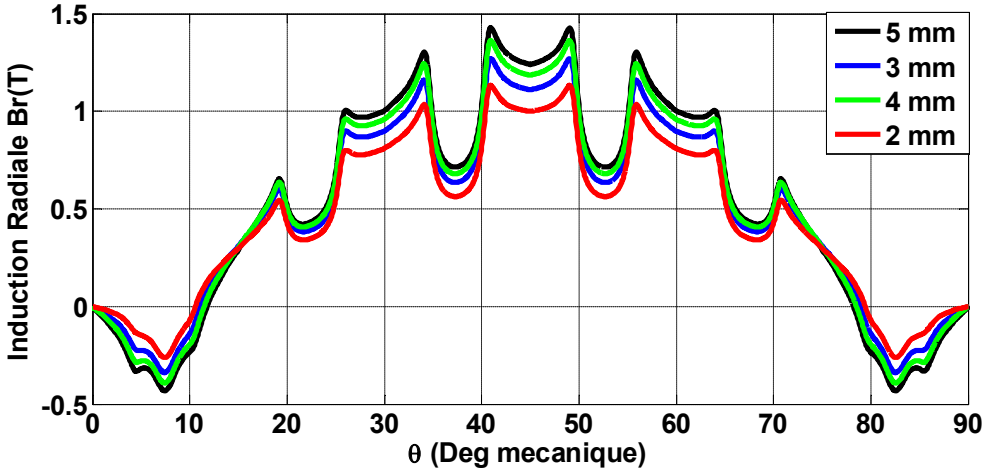


Fig.III.6. a. Influence de l'épaisseur des aimants sur l'induction radiale

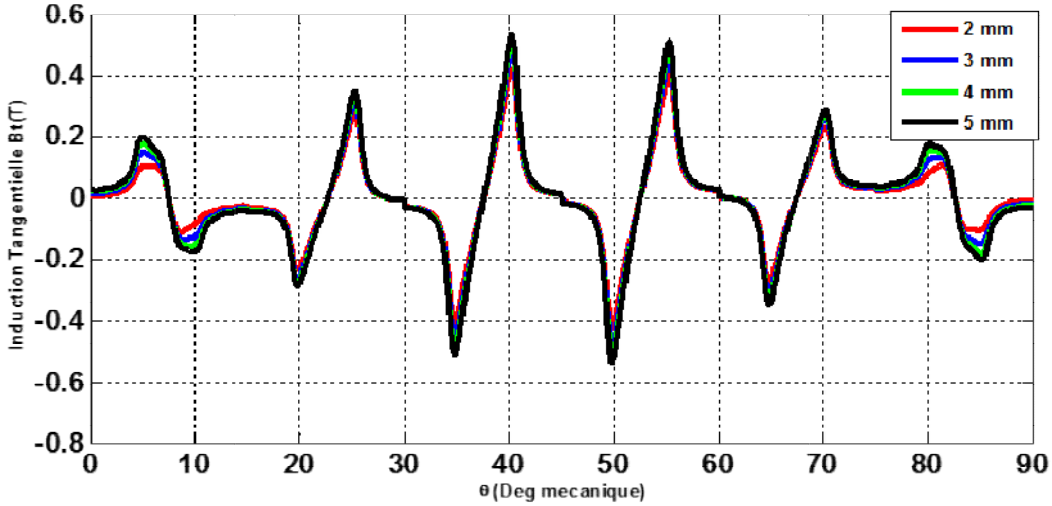


Fig.III.6. b. Influence de l'épaisseur des aimants sur l'induction tangentielle

III.4.2. Influence d'épaisseur de l'entrefer

La Fig. III.7 (a et b) représente la variation d'induction radiale et tangentielle crées par l'aimantation sinusoïdale en fonction de l'épaisseur des entrefers. Elle montre que l'amplitude de l'induction est proportionnelle à l'épaisseur de l'entrefer utilisé.

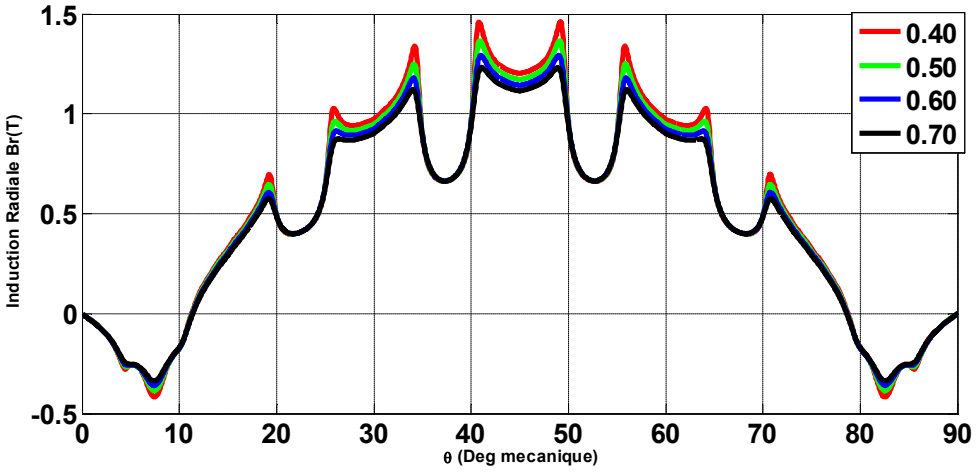


Fig.III.7 (a) Influence de l'épaisseur de l'entrefer sur l'induction radiale

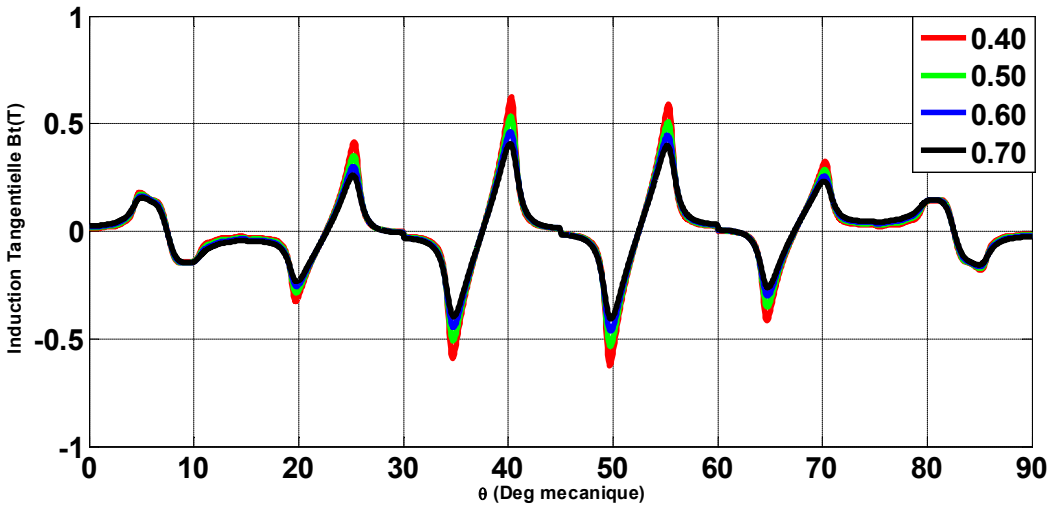


Fig.III.7 (b) : Influence de l'épaisseur de l'entrefer sur l'induction tangentielle

III.4.3. Influence d'ouverture des aimants

L'ouverture des aimants détermine la forme d'onde. Elle passe d'une forme proche d'une sinusoïde pour les petites ouvertures à des formes quasi-trapézoïdales pour des ouvertures proches du pas polaire. Il y a des ondulations, causées par la variation de l'entrefer mécanique. En effet, l'amplitude de l'induction reste inchangée toutefois.

La Figure. III.8 (a) et (b) a montré la répartition de l'induction radiale et tangentielle pour différentes ouvertures des aimants au milieu de l'entrefer.

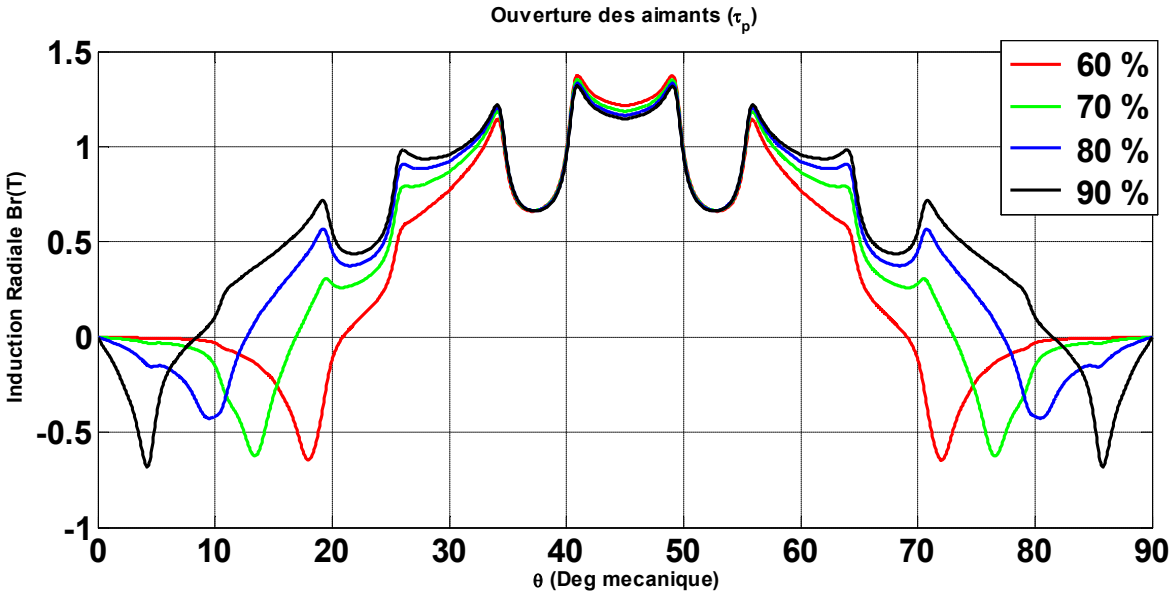


Fig.III.8. a. Influence d'ouverture des aimants de sur l'induction radiale

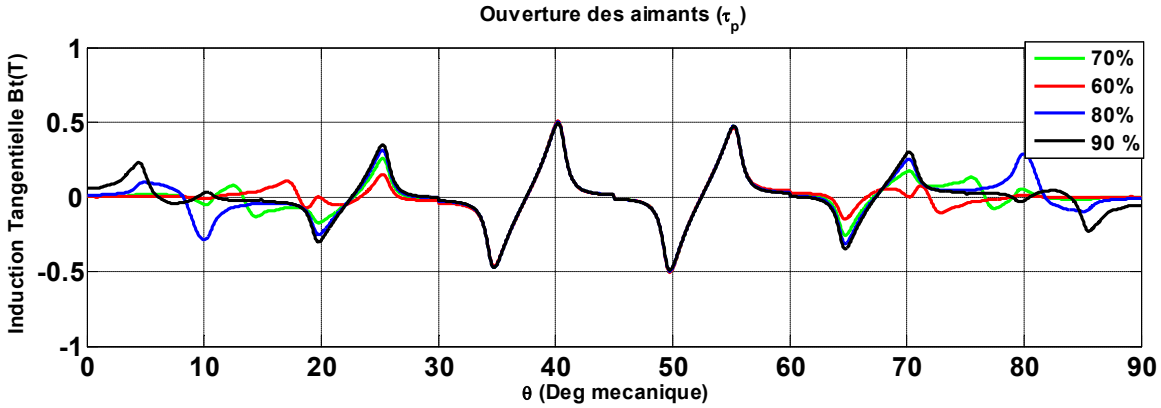


Fig.III.8. b. Influence d'ouverture des aimants de sur l'induction tangentielle

III.5. Influence des paramètres géométriques sur le couple électromagnétique

III. 5. 1. Taux d'ondulation

Certaines applications exigent un couple avec un minimum d'ondulations. Nous cherchons à minimiser ces ondulations provoquées par la structure étudiée. Le taux d'ondulation est défini par :

$$\tau(\%) = \frac{\Gamma_{max} - \Gamma_{min}}{\Gamma_{moy}} * 100\% \qquad \text{(III.1)}$$

Où :

Γ_{max} : représente le couple maximal.

Γ_{min} : représente le couple minimal.

Γ_{moy} *:* représente le couple moyen.

Nous cherchons donc un taux d'ondulation minimal en fonction des paramètres géométriques de la machine. La Figure (III.9) montre l'influence du volume de l'aimant en fonction du couple moyen. L'augmentation du volume des aimants permet d'améliorer la valeur moyenne de l'induction ce qui conduit à augmentation des valeurs du couple**.**

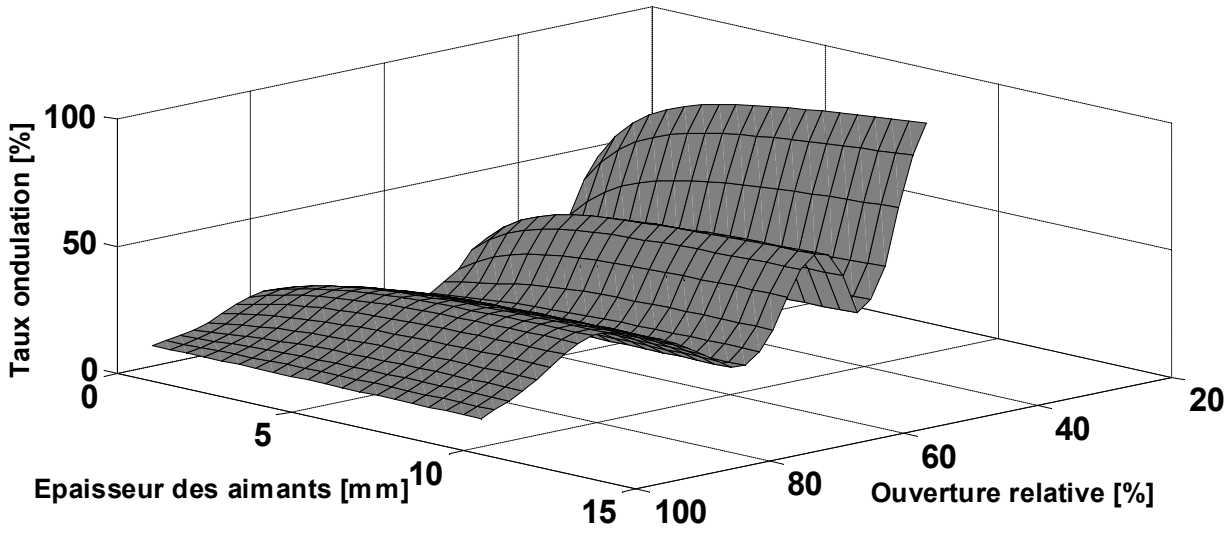


Fig.III.9. Influence de l'épaisseur et l'ouverture des aimants sur le taux d'ondulation

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons confirmé et validés le modèle Analytique par comparaison des résultats obtenus avec la méthode des éléments finis dans les deux cas (stator lisse et encoché), cette méthode développé pour le calcul électromagnétique des machines à aimants, La répartition de l'induction au niveau de l'entrefer est fortement influencée par les dimensions des aimants.

Pour une épaisseur d'aimant donnée, une sélection des ouvertures relatives des aimants permet d'agir sur la forme d'onde de l'induction radiale et tangentielle. La forme d'onde de couple est influencée par le taux d'ondulation dès que le taux d'ondulation grand dès que la forme du couple est très ondulée.