HAL open science

Structures polyentrefers : solutions pour les entrainements directs ?

Hamid Ben Ahmed, Laurent Prevond, Bernard Multon

To cite this version:

Hamid Ben Ahmed, Laurent Prevond, Bernard Multon. Structures polyentrefers : solutions pour les entrainements directs ?. Colloque Conversion Electromécanique Directe (CEMD) 1999, Feb 1999, CACHAN, France. pp.95-100. hal-00674080

HAL Id: hal-00674080

https://hal.science/hal-00674080v1

Submitted on 24 Feb 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

STRUCTURES POLYENTREFERS : SOLUTIONS POUR LES ENTRAINEMENTS DIRECTS ?

MULTI-AIRGAP STRUCTURES : SOLUTIONS FOR DIRECT DRIVERS ?

H. Ben Ahmed, L. Prévond, B. Multon
Laboratoire d'Electricité, Signaux et Robotique (LESiR, URA CNRS D 1375)
ENS Cachan - Antenne de Bretagne
Campus de Ker Lann, 35170 BRUZ.
E-mail : benahmed@bretagne.ens-cachan.fr

Abstract :
Direct drivers necessitate particularly electromechanical mechanisms with a high specific effort. This performances obtained from "classical" structures are limited notably by the magnetic saturation. Typical maximal performances, related to the active zone volume, are at the level of 3000 N/dm^3. One shows then, under some conditions, that to obtain higher densities than the aforementioned limit, it is necessary to increase simultaneously the conversion frequency as well as the number of air gaps. After a concise topological classification of synchronous structure notably those told with centralised coil, this paper presents the principle of the multiplication of air gap surfaces, the conditions to obtain strong density efforts as well as some examples of realisation. Finally, we give the principle of dimensioning this type of structures.

Résumé :
Les entraînements directs nécessitent particulièrement des dispositifs électromécaniques à forte densité volumique d'effort. Les densités obtenues à partir de structures « classiques » sont limitées notamment par la saturation magnétique. Les performances typiques maximales, relatives au volume de la zone active, sont de l'ordre de 300 N/dm^3 . On montre alors, sous certaines conditions, que pour obtenir des densités supérieures à la limite précitée, il est nécessaire d'accroître simultanément la fréquence de conversion et le nombre de surfaces d'entrefer.
Dans cet article, après une classification topologique sommaire des structures synchrones notamment celles dites *à bobinage global*, nous présentons le principe de la multiplication des surfaces d'entrefer, les conditions d'obtention de fortes densités d'effort ainsi que quelques exemples de réalisation. Enfin, nous donnons le principe de dimensionnement de ce type de structure.

I- Introduction

Dans bon nombre de cas, les applications d'entraînement direct requièrent des actionneurs à grande densité d'effort (vérins électriques, bras de robot, moteur-roue intégré...). Classiquement, lorsqu'il s'agit de produire des couples ou des forces élevés, on accroît les nombres de pôles ou on réduit le pas polaire pour minimiser la quantité de circuit magnétique mais on est confronté à des limites physiques de pression magnétique tangentielle d'entrefer. Cette dernière est limitée par l'induction d'entrefer et par le champ induit maximal. Hormis les cas des machines à bobinages supraconducteurs ou des dispositifs à matériaux électroactifs, l'induction d'entrefer est limitée par la saturation des matériaux ferromagnétiques et le champ par les échauffement ou/et la désaimantation des aimants éventuels. Les pressions tangentielles maximales que l'on peut ainsi atteindre dépassent difficilement les 10 N/cm². Un actionneur se résume ainsi à un système de production de champs magnétiques qui interagissent dans un entrefer dans lequel naissent les efforts. Pour un volume extérieur donné de machine, la zone active se trouve limitée par ces considérations. Une autre voie, imaginée il y a une vingtaine d'années [1, 2] consiste à fractionner la zone active pour accroître les surfaces d'entrefer, on parle alors de structures polyentrefers. Alors, d'un point de vue global, on peut dire que les efforts magnétiques sont générés dans le volume de la zone active, elle-même fractionnée en un grand nombre de surfaces. Mais pour qu'il y ait un gain par rapport aux structures conventionnelles de type synchrones, il est nécessaire d'adopter des structures réluctantes avec ou sans aimants et dont les proportions géométriques respectent des règles particulières sans quoi il n'y a pas de bénéfice.

Dans cet article, nous proposons une classification des topologies de type synchrone et nous dégageons celles qui sont adaptées à la réalisation de structures polyentrefers. Nous faisons ensuite le point sur les réalisations connues de telles machines tournantes et linéaires. Enfin, nous donnons leurs grands principes de dimensionnement.

II– Différentes topologies synchrones

On peut distinguer les actionneurs électriques à partir de deux caractéristiques fondamentales :

- le type de couplage électromagnétique moteur ;
- les dimensions du bobinage induit par rapport au pas de couplage moteur.

Concernant le premier point, nous trouverons dans [3] la définition des différents couplages existants.

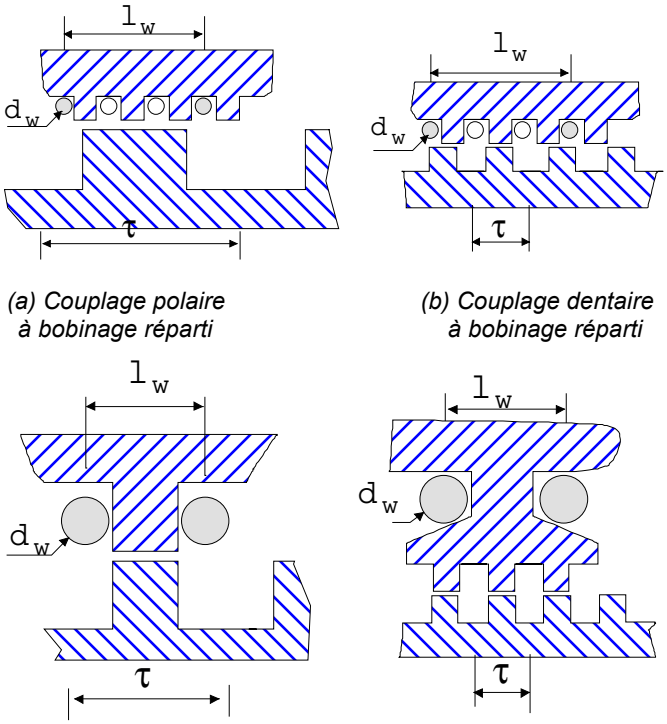
Pour le second point, deux grandeurs caractéristiques sont nécessaires :

- facteur de forme du bobinage induit correspondant au rapport du diamètre d'une spire moyenne (notée l_w) et la dimension caractéristique de la section bobinable (noté d_w) ;
- Le pas de couplage moteur donné par le rapport l_w et le pas inducteur τ .

Suivant ces deux grandeurs, nous pouvons définir quatre types de topologie :

- $l_w / d_w >> 1$ et $l_w / \tau \approx 1$: topologie à <u>*bobinage réparti et à couplage polaire*</u> (machines à champ tournant ou glissant classique où le couplage dentaire correspond à un phénomène parasite, voir figure 1a) ;
- $l_w / d_w >> 1$ et $l_w / \tau << 1$: topologie *à* <u>*bobinage réparti à couplage dentaire*</u> (machines synchrones vernier [8], voir figure 1b) ;
- $l_w / d_w \approx 1$ et $l_w / \tau \approx 1$: topologie à <u>*bobinage dentaire*</u> (machines à grosses dents : SRM, moteur de ventilateur à aimants, voir figure 1c) ;
- $l_w / d_w \approx 1$ et $l / \tau >> 1$: topologie à <u>*bobinage global*</u> (moteur à griffes, moteur à aimants alternés, voir figure 1d).

Les deux dernières topologies sont nécessairement à couplage dentaire. Il est alors nécessaire d'avoir une saillance statorique et/ou rotorique. D'autre part, concernant la topologie à bobinage global, il est possible de définir un *motif élémentaire* représentatif de la zone active. La largeur de ce motif correspondra alors au pas dentaire.



(a) Couplage polaire à bobinage réparti

(b) Couplage dentaire à bobinage réparti

(c) Bobinage dentaire

(d) Bobinage global

Figure 1 Différentes topologies

Notons d'autre part, que par rapport au déplacement, deux configurations possibles de champ magnétique d'induit sont possibles :

- configuration dite à « champ normal » dont le flux magnétique est globalement perpendiculaire au déplacement (voir figure 2a);
- configuration dite à « champ longitudinal » [4] dont le flux magnétique est globalement parallèle au déplacement (voir figure 2b).

Les positions caractéristiques de flux maximal et de flux minimal sont alors inversées d'une configuration à l'autre. Les largeurs des plots par rapport au pas dentaire sont également « inversées » :

$\frac{\tau_s}{\tau} < 0.5$: champ normal (ou fmm normale)

$\frac{\tau_s}{\tau} > 0.5$: champ longitudinal (ou fmm longitudinale)

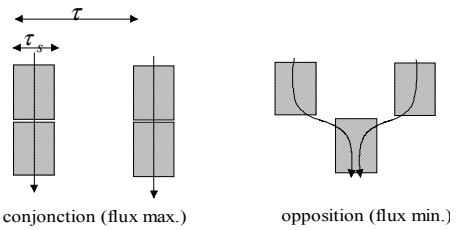


Figure 2a Configuration à Fmm perpendiculaire

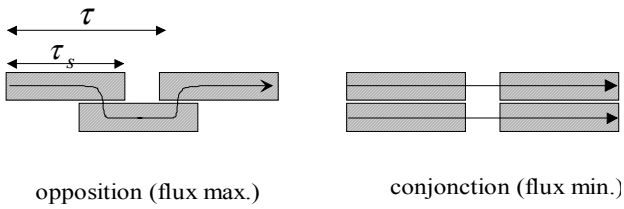


Figure 2b Configuration à Fmm parallèle

III- Principes de la multiplication des surfaces d'entrefer

Dans le cadre particulier des entraînements directs, on cherche des dipositifs à très forte densité d'effort. Les structures « classiques » aussi bien à réluctance variable et/ou à aimants permanents génèrent des densités limites d'effort de l'ordre de 300 N/dm^3 tel que montré par le tableau suivant où sont représentés les performances de quelques actionneurs linéaires industriels.

Référence	**Densité d'effort * (N/dm^3)**
LinearDrives (LD3808)	**130**
Aerotech (BLM96)	**376**
Aerotech (BLM52)	**384**
Avcon (2012)	**306**

* Densité calculée à partir du volume de la zone active.

Tableau 1 Exemple de densités d'effort pour actionneurs linéaires industriels

Ainsi, l'accroissement de ces densités impose l'augmentation de la fréquence de conversion ET du nombre de surface d'entrefer.

Pour le montrer, rappelons tout d'abord l'expression de l'effort moteur. On montre que celui-ci, pour une

structure linéaire comportant q phases et dont le pas de couplage (longueur de déplacement correspondant à un cycle complet) est noté τ, peut s'exprimer à l'aide de la relation simple :

$$< F_t >= q \frac{\Delta W_m}{\tau}$$

où ΔW_m représente l'énergie électromagnétique convertie sur un cycle complet.
Une grandeur intrinsèque caractéristique des performances d'un actionneur est la densité surfacique d'effort $< \sigma_t >$. Celle-ci a pour expression :

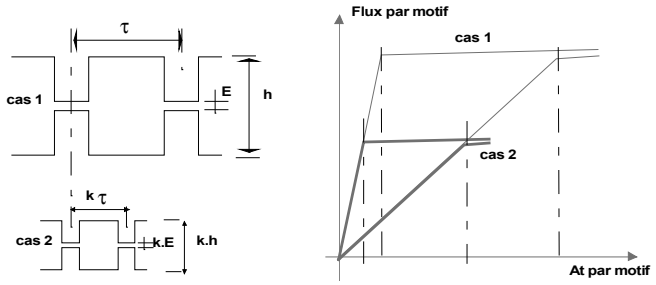
$< \sigma_t >= q \frac{\Delta W_m}{\tau} \frac{1}{S_e}$, où S_e correspond à la surface active d'entrefer.

Ces équations peuvent se ramener aux grandeurs relatives au motif élémentaire :

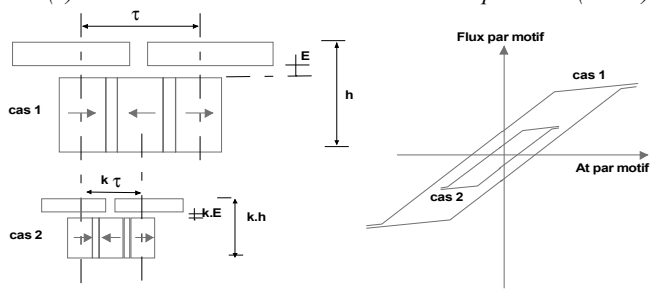
$$< F_t >= q \frac{\delta W_m}{\tau} N_{me}$$

où δW_m correspond à l'énergie magnétique convertie par un motif élémentaire et N_{me} représente le nombre total de motifs composant la zone active.

Ainsi, dans le cas des structures à bobinage global la réduction homothétique d'un facteur k (<1) des dimensions du motif élémentaire (de largeur égale au pas dentaire) modifie l'énergie électromagnétique convertie sur un pas dentaire par le motif δW_m d'un facteur k^2 (voir figure ci-dessous).



cas (a) Structure à réluctance variable et à champ normal (k=1/2)



cas (b) Structure à aimants permanents et à champ longitudinal (k=1/2)

Figure Fractionnement homothétique de la zone active

Néanmoins cette réduction des dimensions permet de multiplier le nombre total de motifs N_{me} dans un même volume actif par $1/k^2$. L'énergie convertie totale ΔW_m est donc conservée (il est de même de la densité surfacique d'effort $< \sigma_t >$). La réduction du pas dentaire (donc augmentation de la fréquence de conversion) à mêmes conditions d'alimentation et de refroidissement, permet alors, en théorie, d'accroître la poussée d'un facteur $1/k$.

Ainsi, dans le cas d'une homothétie totale, la densité d 'effort est proportionnelle à l'accroissement de la fréquence de conversion à condition que cet accroissement s'applique également au nombre de surfaces d'entrefer. Le gain obtenu par cette opération est dans ce cas égal à : $G = 1 / k$.

Dans le cas d'une homothétie partielle (conservation du jeu mécanique), le gain obtenu par le fractionnement de la zone active est moins important que précédemment : $G < 1 / k$.

On montre, à l'aide du calcul des énergies converties, que le fractionnement reste néanmoins favorable $(G > 1)$ à l'accroissement des densités d'effort dans les cas suivants :

- structure à réluctance variable avec des jeux mécaniques très faibles d'où une topologie frottante ;
- structure à aimants permanents.

IV- Exemples de réalisations de structures polyentrefers

Des actionneurs polyentrefers basés sur le principe précité ont été réalisés, notamment au laboratoire d'électrotechnique d'Orsay et au LESiR. Nous donnons dans ce qui suit quelques exemples de ces réalisations.

- La première structure est une machine à aimants permanents alternés (type SmCo) discoïde possédant 3 surfaces d'entrefer (voir figure 3a et 3b). La vitesse de rotation est de 120 tr/mn. La machine développe en régime nominal un couple de 200 Nm pour une masse active d'environs 30 kg, soit un couple massique de près de 7 Nm/kg [5].

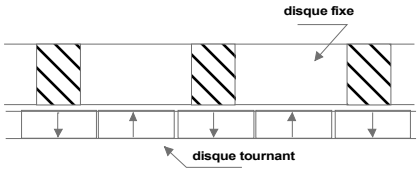


Figure 3a Motif élémentaire

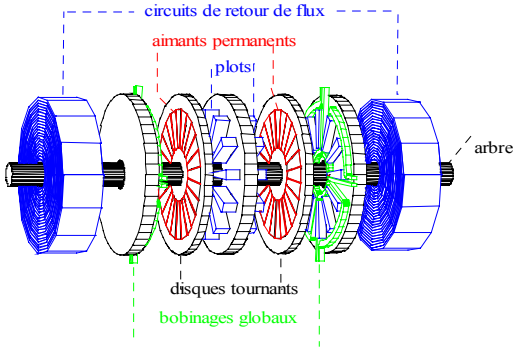


Figure 3b Machine polyentrefer discoïde à AP

- La deuxième structure est un actionneur linéaire à réluctance variable pure à champ longitudinal dont le motif élémentaire est donné à la figure 2b. La structure possède 26 surfaces d'entrefer. Les parties actives fixes et mobiles correspondent à des lames comportant des plots magnétiques représentés sur la figures 4 et 5. Les lames sont frottantes. La masse totale de la partie active est d'environs 2 Kg. La course est de 40 mm avec un pas dentaire de 6 mm. La poussée obtenue dans des conditions d'échauffement en régime permanent est de 1200 N [6]. Cette poussée massique exceptionnelle a été possible grâce au fractionnement important de la zone active et au principe de guidage : guidage par frottement.

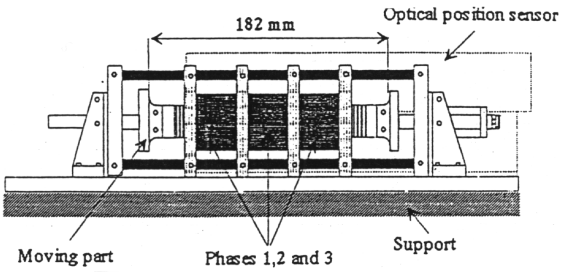


Figure 4 Actionneur linéaire polyentrefer à RV

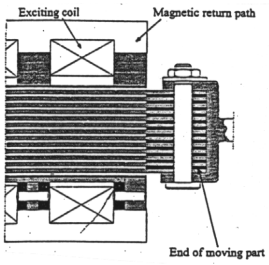
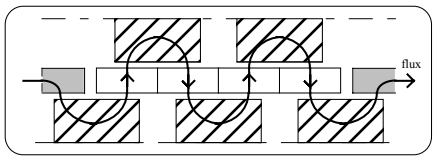
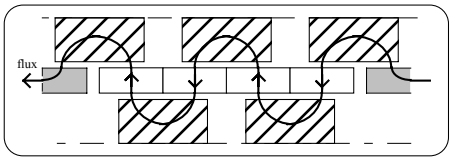


Figure 5 Extrémité de l'actionneur

- La troisième structure est à aimants permanents (NdFeB à 0.65T) à champ longitudinal également [7]. Le motif élémentaire est représenté par la figure 6a et 6b. L'inducteur (partie en déplacement) est passif. Elle est constituée d'étoiles ferromagnétiques (figures 7a et 7b). Les aimants permanents et le bobinage sont fixes.



(a) Conjonction positive



(b) Conjonction négative

Figure 6 Motif élémentaire de l'actionneur polyentrefer à AP et à champ longitudinal

La structure possède 36 surfaces d'entrefer. La course est de 55 mm avec un pas dentaire de 13 mm. Elle développe dans les conditions normales de refroidissement une poussée de 2000 N. Le diamètre extérieur est de 210 mm et la longueur de la partie active est de 280 mm.

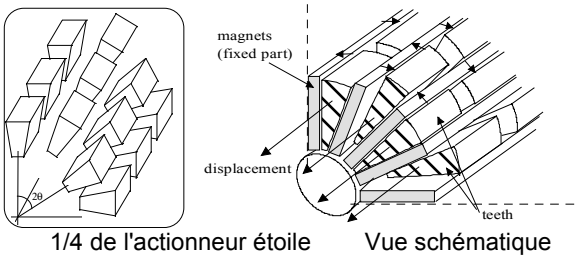


Figure 7a Constitution de la partie active de l'actionneur linéaire

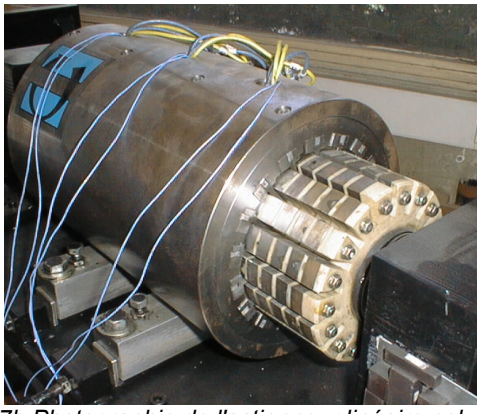


Figure 7b Photographie de l'actionneur linéaire polyentrefer à AP [réalisation : Radio-Energie]

V- Dimensionnement des structures polyentrefers

Le dimensionnement des structures polyentrefers nécessite une approche combinée *éléments finis - schéma réluctant*. En effet, comme mentionné précédemment, ces structures imposent un fractionnement important de la zone active. Cette dernière est donc composée d'une multitude de motifs élémentaires identiques et de dimension très faible devant les dimensions globales de la machine. Un maillage complet de la machine serait par conséquent prohibitif aussi bien en taille mémoire qu'en temps de calcul. Une approche combinée permet une modélisation fine par éléments finis du motif élémentaire et une modélisation souple par schéma réluctant des parties collectrices de flux.

Le schéma général « réluctant » d'une structure polyentrefer à bobinage global est donné à la figure 8.

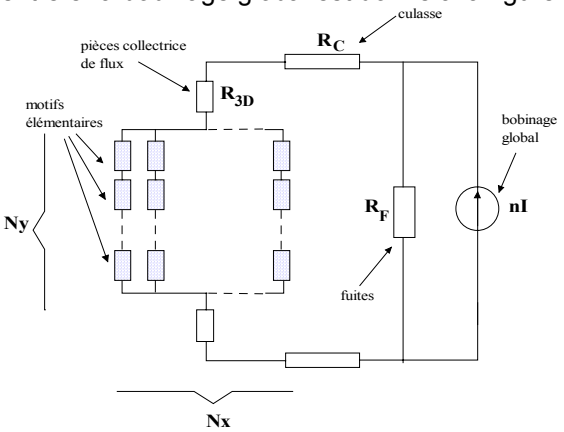


Figure 8 Modélisation combinée d'une machine polyentrefer

Structure à fmm normale	N_x =nombre de pas dentaires suivant le déplacement
	N_y =nombre de surfaces d'entrefer
Structure à fmm longitudinale	N_x =nombre de surfaces d'entrefer
	N_y =nombre de pas dentaires suivant le déplacement

Tableau 2 Signification des nombres N_x et N_y

Le calcul des performances s'effectue à partir du calcul du cycle de conversion représenté dans le plan flux/ampères-tours. Ce calcul est réalisé suivant le diagramme suivant :

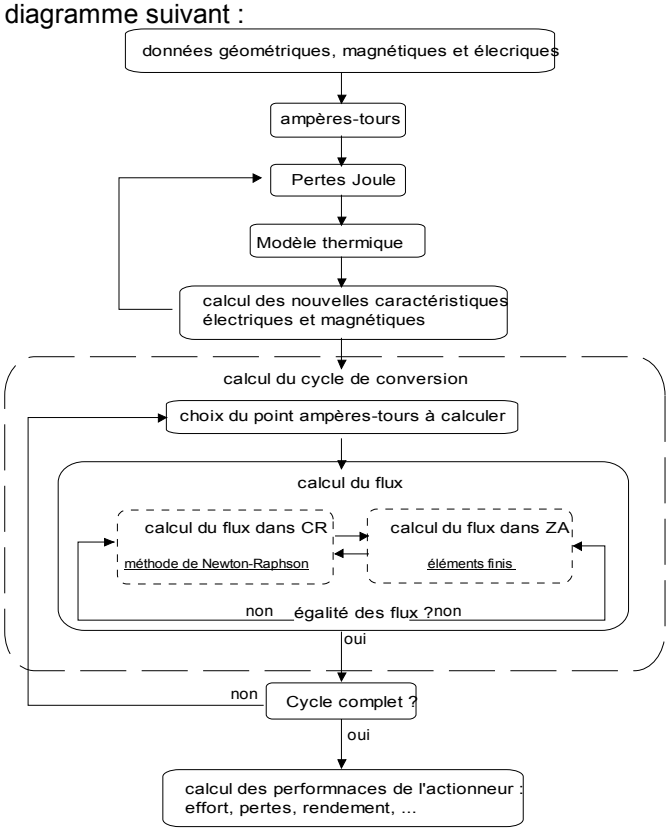


Figure 9 Algorithme de dimensionnement des structures polyentrefers

Les deux zones active (ZA) et celle relative au retour de flux (CR) étant en série (voir figure 10) les flux correspondants doivent être identiques. Cette égalité est obtenue par un calcul itératif. Pour chaque valeur des ampères-tours imposée par le bloc « *choix du point de calcul* », nous déterminons, en faisant varier la fmm (ε_{ZA}) aux bornes de ZA, la variation de la quantité :

$$\Delta\Phi(\varepsilon_{ZA}) = \varphi_{ZA} - \varphi_{CR}$$

La figure 11 illustre la variation de cette quantité dans le cas des structures à aimants permanents.

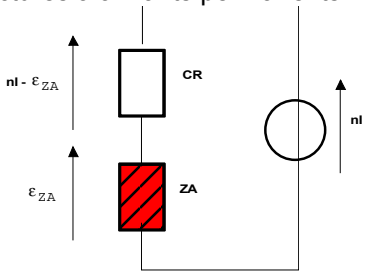


Figure 10

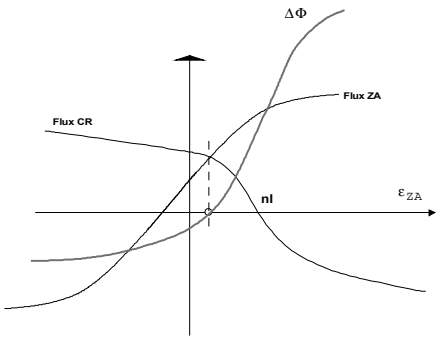


Figure 11

Le calcul du flux dans la zone active (φ_{ZA}) s'effectue par la méthode des éléments finis en ne considérant qu'un motif élémentaire. Celui de la zone CR (φ_{CR}) est effectué par la résolution d'un système matriciel du ci-dessous en utilisant la méthode de Newton-Raphson.

$$\begin{bmatrix} [L] \\ \left[S/\mu\right] \end{bmatrix} . [H] = \begin{bmatrix} [nI] \\ [0] \end{bmatrix}$$

où $[L]$ représente une sous matrice « longueur », $[S]$ une sous matrice « section », $[H]$ le vecteur champ magnétique (grandeur inconnue) et enfin $[nI]$ le vecteur source. Concernant la variation de la perméabilité magnétique, celle-ci est prise en compte à partir d'un modèle analytique dont un exemple est donné ci-après :

$$\mu_r = 1 + B_s \frac{1 + H_g - \sqrt{(1 + H_g)^2 - 4H_g(1 - \alpha)}}{2(1 - \alpha)}$$

avec :

$$H_g = \frac{\mu_{ro} - 1}{B_s}$$

où μ_{ro} correspond à la perméabilité relative initiale, B_s est l'induction à saturation et α est le coefficient dit de courbure. Les valeurs typiques de ces grandeurs pour un matériau magnétique doux sont les suivantes :

μ_{ro}	α	B_s
1000	0.32	1.6

Tableau 3 Exemple de valeurs

Le choix des points ampères-tours à calculer s'effectue à partir d'une méthode graphique [9] permettant la minimisation du rapport *(nombre de points de calcul)/précision*. Un exemple de cycle de conversion obtenue par cette méthode relatif à l'actionneur de la figure 7 est donné à la figure 12.

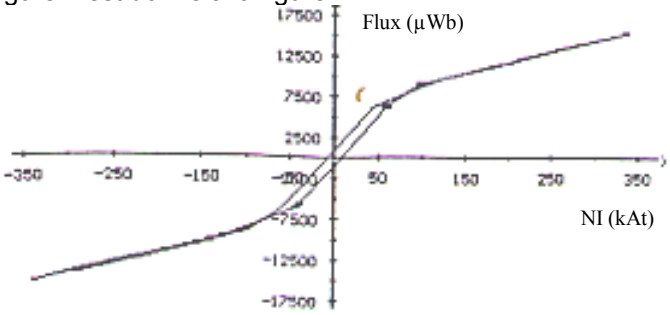


Figure 12 Exemple de cycle de conversion calculé relatif à l'actionneur de la figure 7.

VI- Conclusion

Dans cet article des exemples d'actionneurs polyentrefers à forte densité volumique d'effort de conception originale ont été présentés. Ces topologies ont permis l'obtention de très hautes performances massiques (>1000 N/dm^3) et semblent bien adaptées aux entraînements directs. Ces résultats sont néanmoins tributaires du taux de fractionnement de la zone active et du jeu mécanique réalisables.

Ainsi, Il est important de souligner ces difficultés de réalisation mécanique notamment :

- fabrication de plots magnétiques et d'aimants de faible dimension et leur montage ;
- respect d'un jeu mécanique faible. Cette difficulté est particulièrement présente dans le cas d'actionneurs linéaires.
- Présence d'efforts normaux importants de collage liés au décentrage des parties mobiles par rapport aux parties fixes.

VII- Bibliographie

[1] Rioux C.« Théorie générale comparative des machines électriques établie à partir des équations du champ électromagnétique ». R.G.E. - mai 1970 - t.79, N°5, pp.415-421.

[2] Rioux C.« Aspects préliminaires de la théorie des machines électriques comportant des matériaux ferromagnétiques » Rev. Phys. Appl. 15, octobre 80, pp.1505-1515.

[3] Ben Ahmed H., Prévond L., Multon B., Salamand B., Lucidarme J. «Special Synchronous Linear Actuators : Structures and Performances », Revue Electromotion, 1998 (à paraître).

[4] Rioux C., Guillet R., Roche J., Lucidarme J., Pouillange J. « Moteur électrique polyphasé à réluctance variable », Brevet Européen, déposant : CNRS, N° EP 0 2 218 521 A1, Avril 1987.

[5] Desesquelles PF., Lucidarme J., Ben Ahmed H. « Theoritical and Experiment Results Upon Multi-Airgap Axial Synchronous Machines With Permanent Magnets », ICEM'90, Cambridge Ma. (USA), August 1990.

[6] Matt D., Goyet R., Lucidarme J., C. Rioux. « Longitudinal Field Multi-airgap Linear Reluctance Actuator », Elect. Mach. And Power Sys., vol. 13, n°5, 1987.

[7] Amiet M., Lucidarme J. « Accélérateur ou actionneur linéaire », Brevet Français, déposé par l'Etat, N° 95 15703, Décembre 1995.

[8] Llibre J.F., Matt D., « Vernier reluctance magnet machine for electric vehicle », ICEM'94, Paris (France), Vol. 1, september 1994, pp : 251-256.

[9] L. Prévond, H. Ben Ahmed, J. Lucidarme, B. Multon., « Méthodologie de prédétermination des performances électromagnétiques d'actionneurs à aimants permanents à commutation de flux en régime non linéaire ». Journal de Physique III, juin 1997.