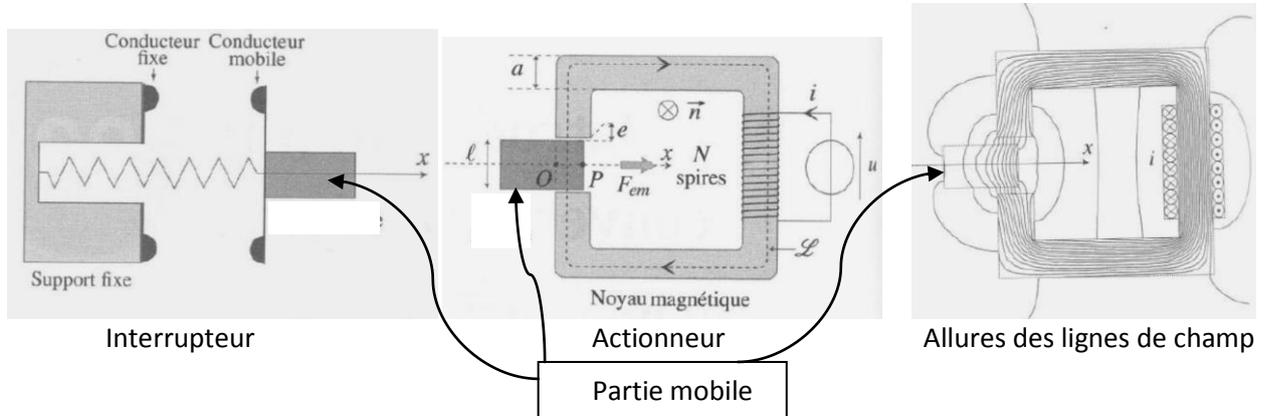


TD N°19 – Conversion électromécanique

EXERCICE 1 : Contacteur électromagnétique :



Expliquer qualitativement le fonctionnement de l'ensemble interrupteur-actionneur.
 En reprenant la démarche du cours, montrer que la force électromagnétique qui s'applique sur la partie mobile peut s'écrire :

$$F_{em} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx} = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot i^2 \cdot a}{4e}$$

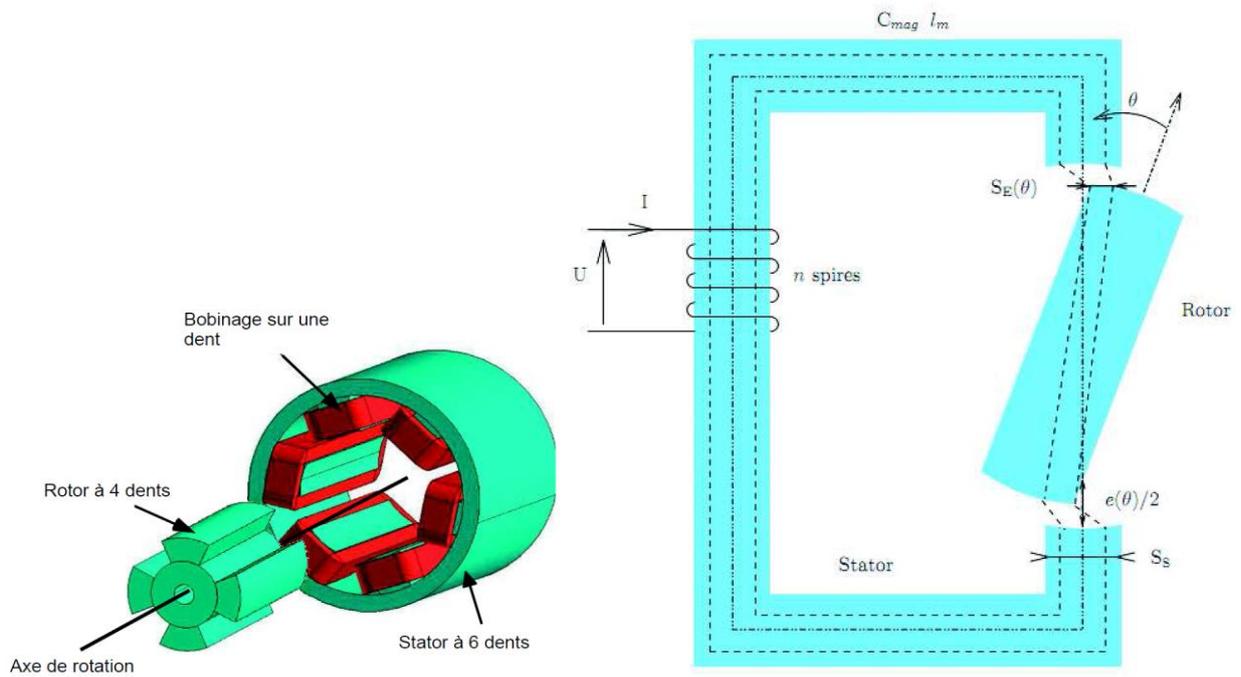
L'axe des x est repéré à partir du point O et x = OP.

EXERCICE 2 : Machine à réluctance variable (X – ENS 2010 extrait)

Les machines électriques sont de type très divers et leur constante évolution ne permet pas d'en faire un classement exhaustif. Parmi les machines électriques classiques, il est possible de citer les machines à courant continu, synchrones et asynchrones. Ces trois types de machines ont plusieurs points communs comme par exemple celui de présenter un couple sans ondulation.

Il existe un autre type de machine, dite à *réluctance variable* (MRV) dont le couple est dû à l'interaction mutuelle entre une partie fixe (bobines) et une partie ferromagnétique mobile. Ces dernières possèdent des caractéristiques très intéressantes : simplicité de fabrication, possibilité de géométries exotiques, robustesse, faible coût et permettent d'atteindre des vitesses très élevées, tout en ayant la possibilité de développer un fort couple à basse vitesse.

Une machine à réluctance variable présente l'avantage d'avoir la structure la plus simple des machines tournantes. Elle est constituée d'un stator en matériau ferromagnétique comportant plusieurs bobinages répartis sur des dents. Le rotor, également en matériau ferromagnétique, guidé en rotation, possède plusieurs dents (Figure 2). Lorsqu'une bobine est alimentée, elle crée un champ magnétique qui a pour conséquence d'entraîner en rotation le rotor afin de l'orienter selon ce champ magnétique, grâce à l'interaction mutuelle entre la partie fixe (bobines) et la partie mobile (rotor). En alimentant successivement les différentes bobines, on peut ainsi générer un mouvement de rotation précis. La conception de la commande de l'alimentation électrique des bobines est la partie la plus délicate à mettre en œuvre. La plupart des moteurs pas-à-pas, par exemple, fonctionne sur le principe d'une machine à réluctance variable.



Afin de comprendre le principe de fonctionnement de la machine à réluctance variable (MRV), seule la machine de type monophasée représentée sur la Figure 4 sera considérée dans cette partie. On notera C_{mag} le chemin magnétique moyen associé au circuit magnétique. Ce chemin est composé d'une longueur moyenne l_m de matériau ferromagnétique et d'une longueur totale d'entrefer, dépendant de l'angle θ , notée $e(\theta) \in [e_{min}; e_{max}]$. La longueur totale du chemin magnétique fermé est donc $l_m + e(\theta)$. Le matériau ferromagnétique est de perméabilité relative μ_r (on note μ_0 la perméabilité du vide assimilée à celle de l'air) et sera supposé non saturé dans l'ensemble du sujet. On appelle \vec{H} l'excitation magnétique et \vec{B} le champ magnétique associé. On supposera que ces deux vecteurs sont constants le long du chemin magnétique (\vec{H}_{mat} , \vec{B}_{mat} dans le matériau ferromagnétique et \vec{H}_{air} , \vec{B}_{air} dans l'entrefer).

Q1 : Expliquer succinctement pourquoi la machine à réluctance variable est plus robuste qu'un moteur à courant continu.

La section moyenne du stator est notée S_s et la section d'entrefer, notée $S_E(\theta)$ et dépendante de l'angle θ , correspond quant à elle à la section équivalente en regard entre le stator et le rotor. Pour simplifier l'étude, on négligera les flux de fuite, ainsi que les effets de bord, mais en revanche, on supposera que cette section d'entrefer varie en fonction de θ , d'un minimum $S_{E, min}$ à un maximum $S_{E, max}$. Le bobinage comportant n spires est alimenté par une tension U et un courant I et possède une résistance globale R_L .

Q2 : Donner le théorème d'Ampère. En déduire la valeur de $\oint_{C_{mag}} \vec{H} \cdot d\vec{l}$. On rappelle que le matériau magnétique est non-saturé. Le chemin magnétique s'appuyant sur un tube de champ magnétique, montrer que le flux ϕ traversant une spire de la bobine s'écrit

$$\phi = \frac{\mu_0 S_s}{\frac{l_m}{\mu_r} + \frac{S_s}{S_E(\theta)} e(\theta)} n I.$$

Q3 : La réluctance magnétique R du montage est définie par la relation $R \phi = n I$. Justifier alors le nom de machine à réluctance variable. Donner la relation entre la réluctance magnétique et l'inductance magnétique L définie par $L I = n \phi$. En fonction de l'angle θ variant de 0 à 2π , donner le tableau de variation des fonctions $e(\theta)$ et $S_E(\theta)$ (l'expression de ces deux fonctions n'est pas demandée). En déduire l'intervalle $[L_{min}; L_{max}]$ dans lequel varie l'inductance au cours du mouvement du rotor.

Q4 : Expliciter la loi de Faraday et donner la loi des mailles pour le circuit électrique.

Un bilan de puissance va être réalisé sur l'ensemble du circuit afin de déterminer le couple électromagnétique appliqué au rotor.

Q5 : On définit l'énergie du champ magnétique par $W_m = \int_{\varphi=0}^{\varphi=\phi} n I(\varphi) d\varphi$, où $I(\varphi) = \frac{n}{L} \varphi$

est le courant traversant la bobine, et φ le flux associé traversant une spire de la bobine. La puissance électrique P_{elec} fournie au système est répartie en pertes par effet Joule P_{Joule} , en puissance mécanique P_{mecc} et en puissance transmise en champ magnétique P_{mag} . On note C le couple électromagnétique appliqué sur le rotor. Écrire le bilan de puissance en explicitant chaque terme.

Q6 : L'énergie magnétique $W_m = \int_{\varphi=0}^{\varphi=\phi} n I(\varphi) d\varphi$ est une fonction d'état dépendant uniquement de la position angulaire θ et du flux magnétique ϕ : $W_m(\phi, \theta)$. A partir du bilan de puissance de la question précédente et de la loi des mailles, montrer que le courant et le couple sont donnés par les relations, pour tout angle θ et tout flux magnétique ϕ :

$$nI = \left(\frac{\partial W_m(\phi, \theta)}{\partial \phi} \right)_{\theta} \quad \text{et} \quad C = - \left(\frac{\partial W_m(\phi, \theta)}{\partial \theta} \right)_{\phi}.$$

Dans le cadre des matériaux non-saturés, l'égalité suivante est vérifiée :

$$W_m = \int_{\varphi=0}^{\varphi=\phi} n I(\varphi) d\varphi = \frac{1}{2} L I^2(\phi, \theta)$$

Q7 : Déduire l'expression du couple électromagnétique instantané C appliqué sur le rotor en fonction de la dérivée $\frac{dL(\theta)}{d\theta}$. Montrer alors que le couple électromagnétique moyen sur un tour du rotor est nul à courant constant.

Dans le cas où le courant est constant, le couple moyen est nul sur un tour et le moteur ne peut pas fonctionner. Le principe d'alimentation d'une machine à réluctance variable est donc d'injecter un courant quand la dérivée $\frac{dL(\theta)}{d\theta}$ est positive, de façon à avoir un couple

instantané positif, et de ne pas injecter de courant quand cette dérivée est négative, afin d'annuler le couple instantané. Ainsi le couple instantané étant positif ou nul, selon les positions angulaires du rotor, le couple moyen est strictement positif. Cette alimentation est possible par l'utilisation d'un onduleur (ensemble adéquat d'interrupteurs commandés électriquement) qui permet d'obtenir un créneau d'intensité: $I = I_{max}$ ou $I = 0$.

Q8 : Déterminer les angles pour lesquels un courant doit être injecté. En déduire la valeur du couple moyen appliqué au rotor de la machine à réluctance variable monophasée en fonction de I_{max} , L_{min} et L_{max} .

Le couple ainsi obtenu est strictement positif et permet au moteur de fonctionner. De façon à lisser le couple et à éviter l'annulation du couple pour certains angles, plusieurs pôles sont utilisés et sont régulièrement répartis (voir Figure 2).