

Chap3 – Introduction à la conversion électro-magnéto-mécanique

Contacteur électromagnétique en translation

1. Mise en évidence expérimentale de la force magnétique

- 1.1. Electroaimant de levage alimenté en courant continu
- 1.2. Electroaimant de levage alimenté en courant sinusoïdal

2. Etude théorique d'un électroaimant de levage

- 2.1. Modélisation simplifiée du dispositif
- 2.2. Energie magnétique dans le modèle linéaire
- 2.3. Force magnétique résultante
- 2.4. Retour à l'expérience introductive

3. Le relais : un exemple de contacteur en translation

- 3.1. Description et intérêt du montage
- 3.2. Force magnétique subie par la partie mobile

Intro : Le couplage entre phénomène électrique et magnétique a déjà été vu en électromagnétisme, notamment en induction. En conversion de puissance, ce couplage est mis à profit notamment par le transformateur. Nous abordons ici un couplage plus complexe encore, puisqu'il est *électrique-magnétique-mécanique*. Ce type de couplage n'est pas vraiment nouveau (cf. force de Laplace), mais la plupart des dispositifs électro-magnéto-mécanique utilisent des matériaux *ferromagnétiques*, et la force de Laplace ne suffit plus à modéliser les *actions mécaniques* (*forces / moments*). Ces dernières se calculent plus facilement à partir de *formules énergétiques*, que nous admettrons.

1. Mise en évidence expérimentale de la force magnétique

1.1. Electroaimant de levage alimenté en courant continu

Un tore ferromagnétique en forme de U renversé (la dernière branche a été retirée) est surélevé par rapport au sol. Un bobinage est enroulé sur une de ses branches, et connecté à une alimentation de courant continu. La dernière branche ferromagnétique du tore est disposée au sol, juste sous le U renversé, à quelques millimètres de distance.

Lorsqu'on fait parcourir un courant I dans le bobinage, on observe qu'au-delà d'un certain seuil en courant, la branche ferro reposant au sol est attirée par le U : la force est toujours attractive et ne dépend pas du signe du courant. Cela suggère que la force dépend du carré du courant. On pourrait le vérifier en mesurant le courant nécessaire pour lever des pièces de masses différentes. On vient de réaliser un *électroaimant de levage*.

❖ Noter la valeur numérique du courant nécessaire au levage de la branche mobile

Si l'on coupe ensuite le courant (initialement positif par exemple), la branche mobile reste fixée au U. Pour que la branche retombe, il faut appliquer un courant légèrement négatif. Ces deux observations successives sont une illustration du caractère non-linéaire du matériau ferromagnétique (cf. cycle d'hystérésis) :

- la branche reste collée à cause de l'aimantation rémanente du tore
- pour annuler l'aimantation, il faut dépasser l'excitation coercitive du matériau

1.2. Electroaimant de levage alimenté en courant sinusoïdal

On utilise le même dispositif, mais alimenté cette fois-ci en courant sinusoïdal. L'alimentation est un alternostat branché sur le secteur, et permettant de délivrer des tensions entre 0 et 220 V efficace, en 50 Hz. Pour des raisons de sécurité électrique, vous n'avez jamais été amenés à utiliser ce genre d'alimentation en TP.

Au-delà d'un certain courant délivré, la branche mobile posée au sol est attirée par le tore en U. Un bruit assez grave, dû à l'excitation sinusoïdale du matériau, accompagne le phénomène. En effet, le paragraphe précédent montre que la force instantanée dépend du carré du courant, le matériau est donc excité en régime sinusoïdal. Un microphone placé à proximité du dispositif enregistre le son émis. Une analyse spectrale montre que le son a un spectre discret, de fondamental 100 Hz. Cela confirme la dépendance de la force avec le carré du courant (cf. la formule de trigo $\cos^2 x = \frac{1}{2}(1 + \cos 2x)$). La force moyenne devrait donc dépendre du carré de la valeur efficace du courant.

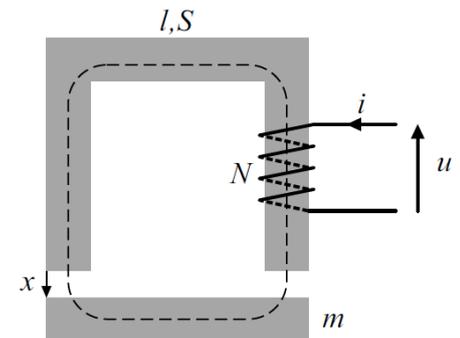
2. Etude théorique d'un électroaimant de levage

Il s'agit ici de se doter d'un modèle simplifié permettant d'exprimer la force exercée par l'électroaimant sur la partie ferromagnétique mobile. Il existe une expression de la 'force subie par un dipôle magnétique' soumis à un champ magnétique extérieur. Son expression n'est pas triviale, et un calcul intégral de la force totale subie par la barre mobile, par sommation des forces élémentaires exercées sur chaque portion de la barre, est délicat. Déterminer la force par une méthode énergétique globale s'avère bien plus simple.

2.1. Modélisation simplifiée du dispositif

Le dispositif expérimental étudié précédemment est schématisé ci-contre. La barre mobile est de masse m , N est le nombre de spires du bobinage, u et i la tension et le courant à ses bornes.

La section S du ferromagnétique est supposée *uniforme* sur tout le contour. Le contour moyen du circuit magnétique est de périmètre l (en absence d'entrefer, i.e. $x = 0$). **L'entrefer** désigne la zone située entre la partie en U et la barre mobile. Son épaisseur est notée x .



Pour simplifier l'étude, on fait les hypothèses suivantes :

- Le ferromagnétique est **linéaire**, de perméabilité relative notée μ_r . Pour réaliser cela en pratique, il suffit que le ferro soit suffisamment doux, et que le courant i ne soit pas trop élevé (pour éviter la saturation)
- il n'y a pas de fuites de flux : le ferro canalise parfaitement les lignes de champ
- les champs sont uniformes dans une section du ferro
- la section du tube de champ dans l'entrefer est égale à la section du ferro

Pour ce dernier point, on rappelle que les lignes de champ magnétique sont orthogonales à l'interface entre un ferro et l'air (cf. chapitre sur les ferros). L'entrefer étant étroit, on admet simplement ici que le tube de champ sortant du ferro en U « n'a pas la place de s'évaser » dans l'entrefer.

2.2. Energie magnétique dans le modèle linéaire

La force s'exprime à partir de **l'énergie magnétique stockée** par le dispositif. On rappelle que cette énergie est stockée par le champ magnétique lui-même, ce dernier étant créé par le *bobinage et le matériau ferromagnétique*.

Le programme parle « d'énergie magnétique d'un enroulement enlaçant un circuit magnétique présentant un entrefer variable », ce qui est ambigu mais signifie la même chose.

Nous savons calculer une énergie magnétique par deux moyens :

- en intégrant la densité volumique d'énergie magnétique (connue dans le vide et dans un ferro linéaire)
 - en utilisant les inductances (valable uniquement si le ferro est linéaire)
- ❖ Rappeler l'expression de l'énergie magnétique E_{mag} stockée par le champ créé par un seul bobinage (formule avec coeff. d'inductance)
 - ❖ A partir de sa définition, exprimer l'inductance propre du dispositif en fonction de la taille de l'entrefer x
 - ❖ En déduire l'expression de l'énergie en fonction de x
 - ⊛ (*Facultatif*) Retrouver cette expression via la première méthode

2.3. Force magnétique résultante

L'expression de la force en fonction de l'énergie n'a pas à être retenue par cœur, elle sera systématiquement donnée par l'énoncé. Dans le cas où la partie mobile est en translation selon \vec{u}_x , la force exercée par le circuit magnétique sur la partie mobile s'écrit : $\vec{F} = \left(\frac{\partial E_{mag}}{\partial x} \right)_i \vec{u}_x$

La dérivation se fait par rapport à la taille de l'entrefer, à courant constant. La démonstration de cette expression (hors programme) est proposée en TD dans un cas particulier.

Remarque : On notera la différence de signe avec l'expression reliant une force conservative à son énergie potentielle en mécanique du point. Le contexte n'étant pas du tout le même (pas de point matériel ici, et E_{mag} n'a pas été définie comme étant une énergie potentielle), cela ne doit pas vous perturber. *On notera par ailleurs que la force tend à maximiser le flux magnétique dans le ferro et à minimiser le flux magnétique dans l'air.*

❖ En déduire l'expression ci-dessous de la force dans le cas du dispositif étudié :

$$F(x) = - \frac{\mu_0 S N i^2}{\left(\frac{l}{\mu_r} + 2x \right)^2}$$

- ❖ La force est-elle bien attractive ? Quand sa norme est-elle maximale ?
- ❖ Dans le cas d'un courant sinusoïdal, exprimer la force moyenne en fonction de l'intensité efficace
- ❖ Que deviennent ces résultats en supposant que μ_r est assez grand pour être considéré infini ?
- ⊛ (Facultatif) Démontrer l'affirmation ci-dessous

Si la perméabilité est infinie, le ferro ne stocke aucune énergie : il suffit alors de calculer E_{mag} dans l'entrefer.

2.4. Retour à l'expérience introductive

On notera que seul l'ordre de grandeur compte ici, car le modèle choisi est très simplifié.

❖ A partir des données expérimentales, déterminer le μ_r du ferromagnétique utilisé en cours ($\mu_r \sim 100$)

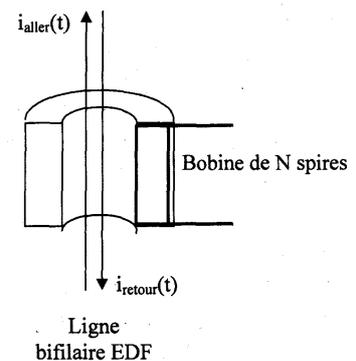
3. Le relais : un exemple de contacteur en translation

3.1. Description et intérêt du montage

Le relais est un contacteur électromagnétique, servant d'interrupteur dans certains dispositifs de sécurité électrique, le disjoncteur différentiel par exemple. Le principe d'un tel disjoncteur est représenté ci-contre. Un tore cylindrique ferromagnétique entoure la ligne bifilaire EDF qui entre dans une pièce. Une ligne assure l'arrivée du courant dans la pièce, l'autre assure son retour. Vu les dimensions considérées, l'ARQS est vérifiée et en fonctionnement normal $i_{aller}(t) = i_{retour}(t)$ à chaque instant.

Si une électrocution a lieu dans la pièce, une partie du courant passe par le corps de la personne et s'enfuit par le sol. Ce courant d'électrocution ne ressort pas par la ligne bifilaire EDF. Donc $i_{aller} > i_{retour}$. La ligne bifilaire crée alors un champ magnétique $B(t)$ non nul dans son environnement, notamment à l'intérieur du tore. Si un bobinage est enroulé sur une section de ce tore ferromagnétique, une fém d'induction y est générée par le champ magnétique variable (50 Hz). C'est pourquoi le disjoncteur est qualifié de *différentiel* : il mesure la différence de courant entre l'entrée et la sortie.

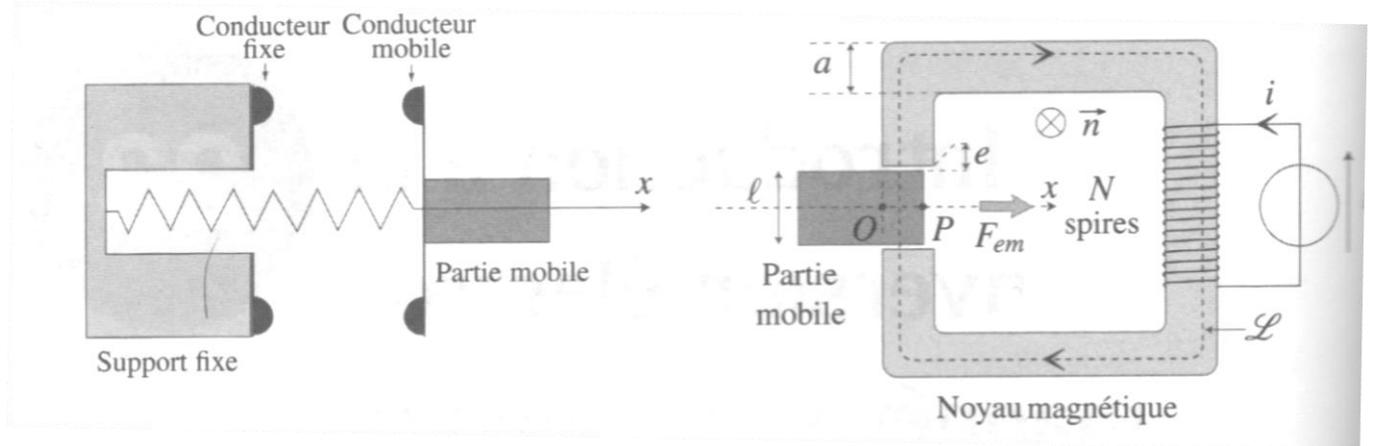
La deuxième partie du disjoncteur est constituée par le contacteur électromagnétique, qui est une sorte d'interrupteur. Ce dernier est un dispositif similaire à l'électroaimant de levage étudié précédemment, et c'est la fém discutée ci-dessus qui alimente le bobinage du contacteur. Lorsque la fém est non-nulle, la partie mobile du contacteur subit une force magnétique (cf. partie précédente), ce qui provoque l'ouverture du circuit EDF sur lequel est branché le disjoncteur différentiel : l'électrocution est donc stoppée, et en général la personne n'a pas subi de dommages physiques importants car l'électrocution a été de très courte durée, et de faible intensité. Les disjoncteurs différentiels visibles en salle de TP sont ceux imposés par les normes de sécurité (les mêmes que chez vous), et limitent la différence de courant « aller-retour » à 30 mA efficace.



3.2. Force magnétique subie par la partie mobile

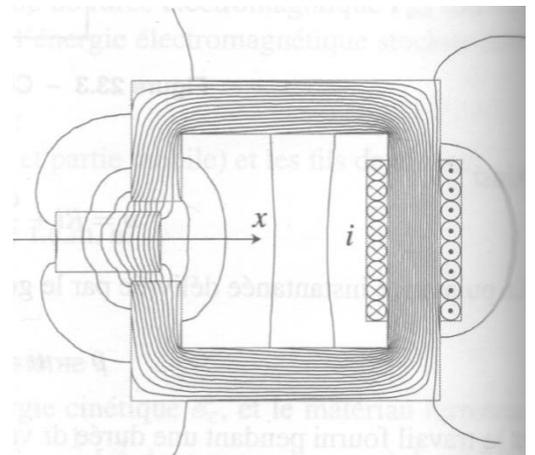
Les schémas ci-dessous représentent de manière simplifiée un interrupteur électromagnétique et sa commande. Sur la figure de gauche, on distingue la partie fixe et la partie mobile de l'interrupteur. En l'absence de force électromagnétique, la partie mobile est maintenue en contact avec la partie fixe de l'interrupteur grâce à un ressort. A droite est représenté le circuit électromagnétique commandant l'ouverture de l'interrupteur. Lorsqu'un courant i parcourt le bobinage enroulé sur le circuit magnétique à entrefer variable (courant provoqué par la fém discutée précédemment), une force magnétique apparaît, qui tend à minimiser le flux magnétique dans l'air et à maximiser le flux magnétique dans le matériau ferromagnétique.

Lorsqu'un courant parcourt le bobinage, la pièce mobile, à l'origine légèrement écartée vers l'extérieur du tore ferromagnétique, est donc attirée vers l'intérieur de l'entrefer de façon à « boucler » le noyau ferro.



On renouvelle l'étude faite pour l'électroaimant de levage, mais dans une géométrie quelque peu différente. Il s'agit d'établir l'expression de la force magnétique ressentie par la partie mobile. Les matériaux magnétiques (tore + partie mobile) sont supposés linéaires, de très grande perméabilité. On repère la position de la partie mobile ferromagnétique par rapport au tore ferro par la coordonnée $x = \overline{OP}$.

La carte de champ ci-contre permet de faire le constat suivant. Dans les deux entrefers ainsi qu'au niveau de la partie mobile ferromagnétique, les lignes de champs magnétiques restent principalement confinées dans une section égale à ax .



- ❖ Déterminer l'énergie magnétique stockée par le dispositif magnétique
- ❖ En considérant la perméabilité relative infinie, en déduire la force exercée sur la partie mobile donnée par l'expression $\vec{F} = \left(\frac{\partial E_m}{\partial x}\right)_i \vec{u}_x$:

$$F = \frac{\mu_0 a}{4e} N^2 i^2$$
- ❖ Commenter physiquement le résultat
- ❖ En supposant que la résistance de la bobine est de l'ordre de 10 ohms, et le nombre de spires de l'ordre de 1000, $a = 1 \text{ cm}$ et $e = 1 \text{ mm}$, quelle tension d'alimentation faut-il appliquer à la bobine pour soulever une partie mobile de 0,1 kg

Le bloc 3 est consacré à la conversion électro-magnéto-mécanique de puissance. Afin d'étudier ces systèmes en prenant en compte le rôle du fer, on privilégie un calcul des actions électromagnétiques en dérivant l'énergie magnétique stockée dans le système par rapport à un paramètre de position. Les milieux magnétiques sont modélisés par des milieux linéaires. La notion de coénergie est hors programme.

Dans une première partie, la méthode de calcul de la force s'exerçant sur une partie mobile de fer est illustrée sur un contacteur en translation faisant partie d'un circuit magnétique dont l'entrefer est variable. À l'aide d'un bilan énergétique, le professeur pourra justifier la relation $F = (\partial E / \partial x)_i$, mais cette démonstration ne doit pas être considérée comme une capacité exigible.

On aborde ensuite le moteur synchrone en dérivant l'énergie magnétique localisée dans l'entrefer afin de déterminer le moment du couple électromagnétique. Les champs glissants statorique et rotorique sont radiaux dans l'entrefer et présentent des formes d'onde sinusoïdales. On montre que le moment moyen est non nul si les champs glissants sont synchrones. Le modèle électrique des phases de l'induit est abordé afin de décrire la conversion électromécanique de puissance, mais on n'étudiera pas l'utilisation d'une machine à vide comme compensateur synchrone.

Dans une troisième partie, on explique le fonctionnement du moteur à courant continu par analogie avec le moteur synchrone, en montrant que le collecteur réalise le synchronisme entre un champ statorique

stationnaire et un champ rotorique qui lui est orthogonal quelle que soit la position angulaire du rotor, produisant ainsi un moment maximal.

On évoque la réversibilité énergétique des machines électriques, en distinguant avec rigueur f_{em} et f_{cm} . La puissance mécanique des machines est reliée à la puissance électrique des forces électromotrices induites par des bilans énergétiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
3. Conversion électro-magnéto-mécanique	
3.1. Contacteur électromagnétique en translation	
Énergie et force électromagnétique.	Exprimer l'énergie magnétique d'un enroulement enlaçant un circuit magnétique présentant un entrefer variable. Calculer la force électromagnétique s'exerçant sur une partie mobile en translation en appliquant l'expression fournie $F = (\partial E / \partial x)_i$.
Applications.	Sur l'exemple du relais, expliquer le fonctionnement d'un contacteur électromagnétique.

Manips :

- *Electro-aimant de levage en courant continu*
 - *force toujours attractive, indépendamment du sens du courant*
 - *observation des effets de l'aimantation rémanente et de l'excitation coercitive*
- *Electro-aimant de levage en courant sinusoïdal (50 Hz, tension efficace ~70 V) :*
 - *analyse spectrale de la magnétostriction : force oscille avec fondamental 100 Hz*