Les électro-aimants

« Il n'y a rien d'incompréhensible »
Isidore Ducasse, dit Comte De Lautréamont in « Poésies »

Résumé

La création d'une force, dite de Laplace, issue des grandeurs magnétiques permet d'envisager une application essentielle en électromécanique, les électro-aimants.

Une série d'hypothèses simplificatrices basées sur celles des circuits magnétiques parfaits permet de déterminer l'expression générale de la force apparaissant lors d'un mouvement de translation. Ce résultat est ensuite étendu au couple.

On envisage ensuite le comportement des circuit magnétiques déformables en régime continu pour exprimer la force portante exercée sur l'armature mobile. En régime sinusoïdal, la force portante est la superposition d'une composante constante et d'une autre variable dans le dans. Les inconvénients de ce résultat sont analysés pour élaborer une solution qui assure une force portante la plus constante possible en évitant son annulation pour diminuer les vibrations des électro-aimants en alternatif.

Dans une dernière partie, un aperçu général montre les structures technologiques des électro-aimants les plus rencontrés.

Sommaire

I. Introduction : définition 2
II. Détermination de la force d'attraction (ou du couple) 2
II.1. Principe 2
II.2. Hypothèses 2
II.3. Détermination de l'énergie magnétique (cas de la translation) 2
II.4. Détermination de l'expression générale de la force 3
II.5. Expression de la force (principe similaire pour le couple) 3
III. Comportement des électro-aimants en régime continu 4
III.1. Expression de la force portante 4
III.2. Analyse et conséquences technologiques 4
IV. Comportement des électro-aimants en alternatif (souvent sinusoïdal) 4
IV.1. Montage de base 4
IV.2. Obtention d'une force constante 5
V. Structures et domaines d'application des électro-aimants 6
V.1. Généralités 6
V.2. Principales structures 6
V.2.1. Les électro-aimants ouverts 6
V.2.2. Les électro-aimants en forme de U 7
V.2.3. Les électro-aimants en forme de E 7
V.2.4. Les électro-aimants cylindriques 8

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

I. Introduction : définition

Un électro-aimant (EA) est un système réluctant générant une induction magnétique susceptible de créer une force. Cette force est utilisée pour déplacer une partie du circuit magnétique et ainsi entraîner un ensemble mécanique.

Généralement un électroaimant est constitué de deux parties : la première, fixe, supporte le bobinage de création de la force magnétomotrice et la seconde, mobile, complète le circuit magnétique déformable. La déformation s'opère de manière à ce que le flux soit le plus grand possible, en diminuant la réluctance globale du circuit magnétique, c'est à dire en diminuant l'entrefer (c'est l'effet de l'application de la règle du flux maximum).

II. Détermination de la force d'attraction (ou du couple)

II.1. Principe

Les mouvements assurés dans les électro-aimants sont la translation ou la rotation de l'armature mobile. La ***Figure 1*** présente les grandeurs relatives à un mouvement de translation et la ***Figure 2*** celles relatives à une rotation.

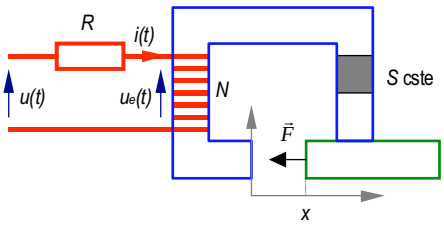


Figure 1 : armature en translation

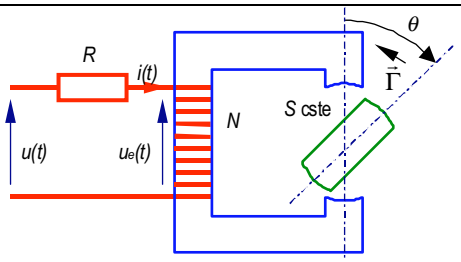


Figure 2 : armature en rotation

II.2. Hypothèses

Sur le plan mécanique, dans le cas de la translation, le glissement de la partie mobile a lieu sans frottement et la section de contact est constante.

Pour l'étude, le circuit magnétique est parfait : la relation d'Hopkinson est applicable. Les analogies aux circuit électriques sont utilisables aussi : lois et théorèmes de l'électrocinétique. La première conséquence de cette hypothèse est la possibilité de définir la réluctance $\mathcal{R}$ du circuit. Seul l'entrefer est variable, $\mathcal{R}$ ne dépend que de la position x (cas d'une translation) ou de l'angle θ (pour les rotations). Le coefficient d'induction L dépend donc lui aussi de x ou θ.

La résistance électrique de l'enroulement est supposée nulle : $R = 0$.

II.3. Détermination de l'énergie magnétique (cas de la translation)

On rappelle l'expression de la densité volumique d'énergie magnétique : $W_{vol} = \int_{vol} BdH$.

Pour un CMP, $B = \mu_0\mu_r H$, donc $W_{vol} = \frac{1}{2}\mu_0\mu_r H^2 = \frac{1}{2\mu_0\mu_r}B^2$ (en J.m^{-3}).

Le circuit magnétique de l'électro-aimant se compose du matériau (section S, longueur l constante, perméabilité magnétique μ_r) et de l'entrefer (section S, longueur x variable). L'induction est identique sur chaque section du circuit magnétique, l'énergie se décompose donc en deux parties.

Dans le circuit magnétique

$$W_{CM} = W_{volCM}.V_{CM} = \frac{1}{2\mu_0\mu_r}B^2V_{CM} = \frac{1}{2}\frac{1}{\mu_0\mu_r}\frac{l}{S}B^2S^2 = \frac{1}{2}\mathcal{R}_{CM}\phi^2 .$$

Dans l'entrefer

$$W_e = W_{volE}.V_e = \frac{1}{2\mu_0}B^2Sx = \frac{1}{2}\frac{1}{\mu_0}\frac{x}{S}B^2S^2 = \frac{1}{2}\mathcal{R}_e\phi^2 .$$

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Globalement : $W_{mag} = W_{CM} + W_e = \frac{1}{2}\mathcal{R}_{CM}\phi^2 + \frac{1}{2}\mathcal{R}_e\phi^2 = \frac{1}{2}(\mathcal{R}_{CM} + \mathcal{R}_e)\phi^2$ donc $\boxed{W_{mag} = \frac{1}{2}\mathcal{R}(x)\phi^2}$.

Or $\phi_T = N\phi = \frac{N^2 i}{\mathcal{R}(x)} = L(x)i$, donc $W_{mag} = \frac{1}{2}\mathcal{R}(x)\left(\frac{L(x)}{N}\right)^2 i^2$, soit $\boxed{W_{mag} = \frac{1}{2}L(x)i^2(t)}$.

II.4. Détermination de l'expression générale de la force

L'énergie apparaît sous forme électrique, magnétique ou mécanique. Le système étant étudié en translation, l'expression de chacune d'entre-elles est effectuée pour une variation élémentaire du temps dt, du flux dϕ ou du déplacement dx. Le bilan énergétique permettra de déterminer l'expression de l'énergie magnétique W_{mag}.

Variation de l'énergie électrique

$dW_e = u(t)i(t)dt$ or $u(t)dt = Nd\phi$ (loi de Faraday) donc $dW_e = Ni.d\phi$

Variation de l'énergie mécanique

Il n'y a que le mouvement de translation : $dW_{mec} = \vec{F}.d\vec{x} = -Fdx$ (dans le repère de la ***Figure 1***)

Variation de l'énergie magnétique

On la note dW_{mag}

Bilan énergétique

Toute l'énergie électrique est convertie en énergie magnétique ou mécanique :

$$dW_e = dW_{mag} + dW_{mec} \Rightarrow Ni.d\phi = dW_{mag} - Fdx$$

Donc : $\boxed{dW_{mag} = Ni.d\phi + Fdx}$

L'énergie magnétique s'exprime sous la forme d'une différentielle dépendant de x et du flux ϕ.

On peut alors écrire de manière générale : $dW_{mag} = \frac{\partial W_{mag}}{\partial \phi}d\phi + \frac{\partial W_{mag}}{\partial x}dx$

C'est à dire : $\boxed{Ni(t) = \frac{\partial W_{mag}}{\partial \phi}}$ et $\boxed{F = \frac{\partial W_{mag}}{\partial x}}$

De manière générale, voici les expressions de la force et du couple :

$F = \frac{\partial W_{mag}}{\partial x}$ avec $W_{mag} = \frac{1}{2}\mathcal{R}(x)\varphi^2$ $\qquad$ $\Gamma = \frac{\partial W_{mag}}{\partial \theta}$ avec $W_{mag} = \frac{1}{2}\mathcal{R}(\theta)\varphi^2$

$F = -\frac{\partial W_{mag}}{\partial x}$ avec $W_{mag} = \frac{1}{2}L(x)i^2$ $\qquad$ $\Gamma = -\frac{\partial W_{mag}}{\partial \theta}$ avec $W_{mag} = \frac{1}{2}L(\theta)i^2$

II.5. Expression de la force (principe similaire pour le couple)

Energie magnétique : $W_{mag} = \frac{1}{2}\mathcal{R}(x)\phi^2$ $\qquad$ Réluctance $\mathcal{R}(x) = \mathcal{R}_{CM} + \mathcal{R}_e = \frac{1}{\mu_0\mu_r}\frac{l}{S} + \frac{1}{\mu_0}\frac{x}{S}$

La réluctance $\mathcal{R}_{CM}$ est indépendante de x, donc $F = \frac{\partial W_{mag}}{\partial x} = \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\mu_0}\frac{x}{S}\phi^2\right) = \frac{1}{2\mu_0 S}\phi^2 = \frac{B^2 S}{2\mu_0}$

L'effort (force portante) développé sur la partie mobile est donc : $\boxed{F = \frac{1}{2\mu_0}B^2 S}$

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

III. Comportement des électro-aimants en régime continu

III.1. Expression de la force portante

L'entrefer a une épaisseur $e + x$. La longueur e est la partie constante de cet entrefer.

Le courant est maintenu constant : $i(t) = I$ et $F = \frac{1}{2\mu_0} B^2 S$.

Loi d'Hopkinson : $NI = \mathcal{R}(x)\phi = BS\mathcal{R}(x)$.

En combinant ces deux relations : $F = \frac{1}{2\mu_0}\left(\frac{NI}{\mathcal{R}(x)S}\right)^2 S$

Enfin, en introduisant l'expression de la réluctance $\mathcal{R}(x) = \frac{1}{\mu_0}\frac{e+x}{S}$: $\boxed{F = \mu_0 \frac{N^2 I^2}{2} S \frac{1}{(e+x)^2}}$

III.2. Analyse et conséquences technologiques

La représentation graphique de la force portante en fonction de l'écartement x de l'entrefer est donnée à la ***Figure 3***.

L'effort est d'autant plus faible que la distance augmente.

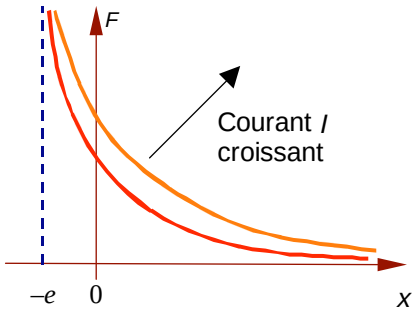


Figure 3 : force portante fonction de l'écartement.

Conséquences

Dans un électro-aimant de contacteur (par exemple), l'entrefer est d'abord important car le circuit magnétique est ouvert. Pour assurer la force de décollement, il faut augmenter le courant I. Or, les bobines sont alimentées en tension, si bien que le courant est élevé au début de la fermeture, puis diminue à mesure que l'entrefer se ferme. C'est ce qui justifie le courant d'appel à la fermeture des contacts.

IV. Comportement des électro-aimants en alternatif (souvent sinusoïdal)

L'hypothèse de Kapp dans le circuit magnétique parfait indique qu'il n'a pas de fuites et que la résistance électrique est nulle. En conséquence, la chute de tension liée à ces termes est nulle :

$$r.i(t) + L_f \frac{di(t)}{dt} = 0$$

IV.1. Montage de base

Le bobinage est alimenté par la tension sinusoïdale $u(t) = U\sqrt{2}\cos\omega t$ (***Figure 4***).

Expression de la force : $F(t) = \frac{[\phi(t)]^2}{2\mu_0 S}$.

Loi de Faraday : $u(t) = N\frac{d\phi(t)}{dt} = U\sqrt{2}\cos\omega t$

On en déduit $\phi(t) = \frac{U\sqrt{2}}{N\omega}\sin\omega t + \phi(0)$

Si $\phi(0) = 0$: $\boxed{F(t) = \frac{U^2}{2\mu_0 S N^2 \omega^2}(1 - \cos 2\omega t)}$

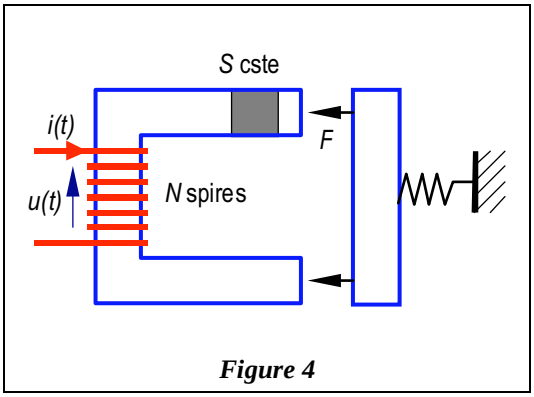


Figure 4

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

La force portante n'est pas constante (illustration en ***Figure 5***). Elle se décompose en deux parties :

- une force moyenne constante, la partie utile, $F_0 = \dfrac{U^2}{2\mu_0 S N^2 \omega^2}$,
- une force variable de fréquence double $F_v = -\dfrac{U^2}{2\mu_0 S N^2 \omega^2}\cos 2\omega t$

On observe deux inconvénients : F s'annule deux fois par période de la tension $u(t)$ et ses fluctuations sont la source de vibrations dans le domaine audible (100 Hz). On envisage une solution pour y remédier.

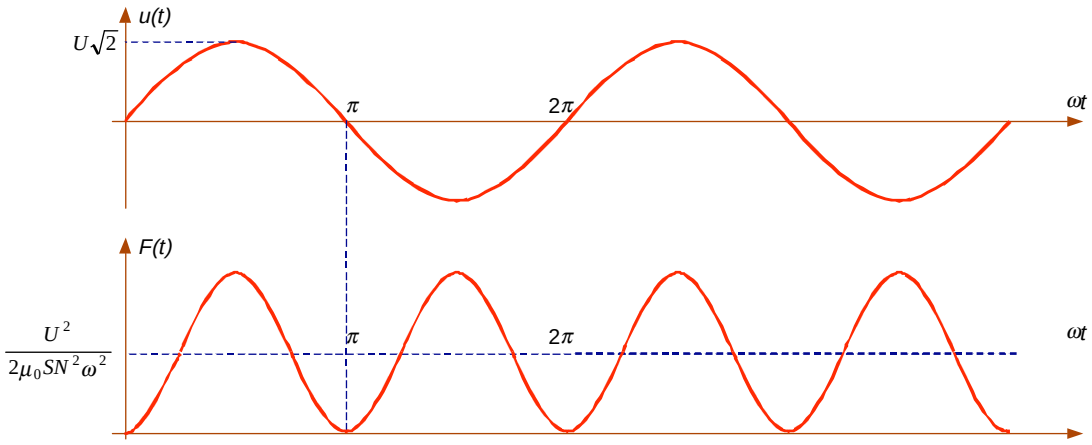


Figure 5 : représentation des grandeurs essentielles.

IV.2. Obtention d'une force constante

Mise en place

Une solution au problème précédent consiste à superposer un flux déphasé au flux principal. Pour cela, on ajoute un circuit magnétique dans lequel prend naissance un courant créant un flux déphasé : c'est la **spire de Frager** (***Figure 6***).

Le flux $\phi_1(t)$ est créé par le bobinage alimenté par la tension $u(t)$.

Le flux $\phi_2(t)$ est créé par le bobinage alimenté par $u(t)$ et par le courant induit créé dans la spire de Frager.

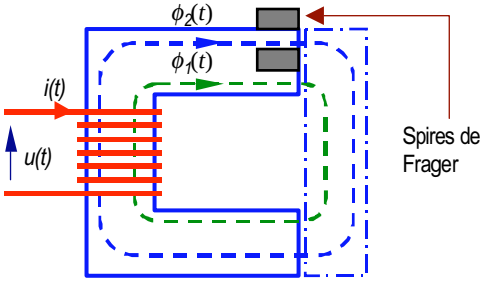


Figure 6 : spires de Frager.

Expression de la force

$$F(t) = \frac{1}{2\mu_0}\left(\frac{[\phi_1(t)]^2}{S_1} + \frac{[\phi_2(t)]^2}{S_2}\right)$$

$\phi_2(t)$ est la superposition de l'effet de $u(t)$ et de celui du courant induit dans la spire qui est donc en opposition,. Globalement, cela se traduit globalement par un déphasage négatif (ϕ_2 est en retard sur ϕ_1).

Les flux s'expriment par :

- $\phi_1(t) = \Phi_{1M}\sin\omega t$
- $\phi_2(t) = \Phi_{2M}\sin(\omega t - \theta)$ (θ est le déphasage de ϕ_2 est *en retard* sur ϕ_1).

D'où la force : $F(t) = \dfrac{1}{2\mu_0}\left(\dfrac{\Phi_{1M}^2}{S_1}\sin^2\omega t + \dfrac{\Phi_{2M}^2}{S_2}\sin^2(\omega t - \theta)\right)$

Cette force est la superposition d'une composante constante (valeur moyenne) et d'une partie fluctuante de fréquence quatre fois supérieure à celle de la tension.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

La spire de Frager est dimensionnée pour que l'écriture soit plus simple :

- en obtenant un déphasage θ entre ϕ_1 et ϕ_2 proche de $\frac{\pi}{2}$;
- des amplitudes $\frac{\Phi_{1M}^2}{S_1}$ et $\frac{\Phi_{2M}^2}{S_2}$ identiques, $\frac{\Phi_M^2}{S} = \frac{\Phi_{1M}^2}{S_1} = \frac{\Phi_{2M}^2}{S_2}$ avec S section équivalente.

Ceci fournit l'écriture de la force portante : $\boxed{F = \frac{\Phi_M^2}{2\mu_0 S}}$.

La force portante est désormais constante, elle ne s'annule plus et le fonctionnement résultant est plus silencieux (illustration à la ***Figure 7***).

Remarque : si l'ajustement de θ, Φ_{1M} ou Φ_{2M} est imprécis, une légère ondulation subsistera autour de la force moyenne.

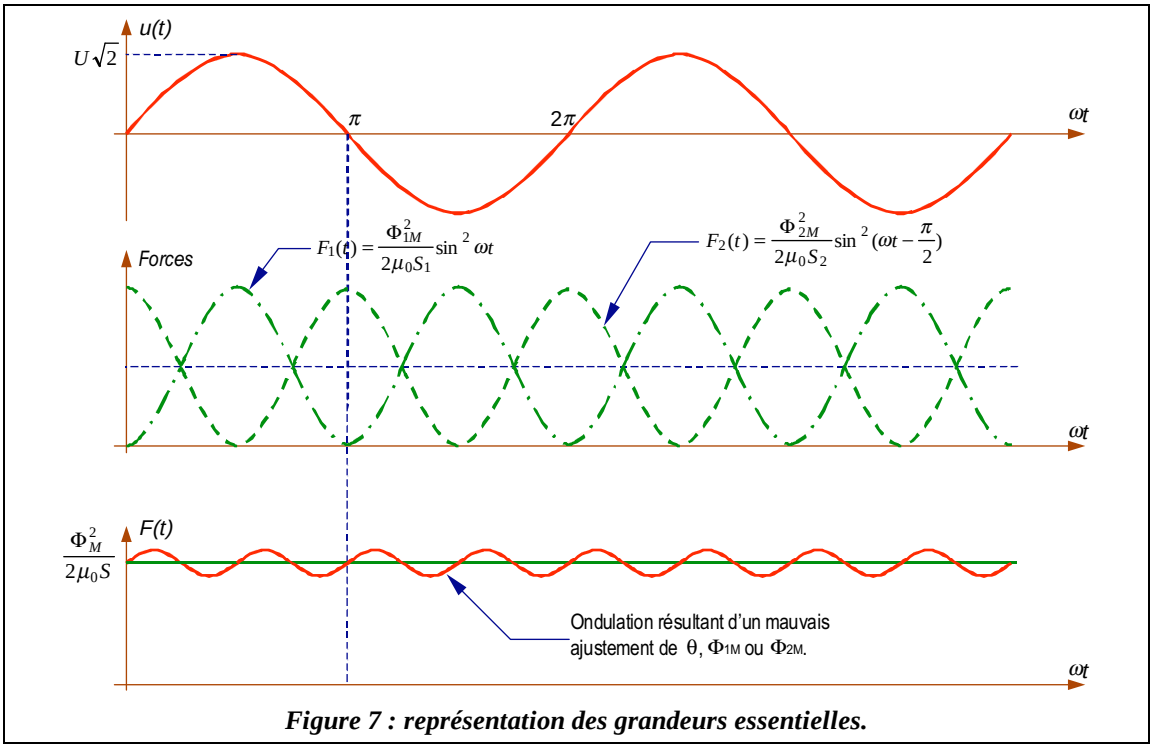


Figure 7 : représentation des grandeurs essentielles.

V. Structures et domaines d'application des électro-aimants

V.1. Généralités

Les applications des électro-aimants sont très nombreuses. Citons les plus importantes :

- relais et contacteurs ;
- embrayages et freins ;
- électro-aimants de levage ;
- électrovannes et servo-valves.

V.2. Principales structures

Les électro-aimants ont des formes très diverses suivant les applications auxquels ils répondent.

V.2.1. Les électro-aimants ouverts

Dans ces électro-aimants, le circuit magnétique est terminé par les éléments à déplacer. Les noyaux sont souvent en forme de U, de E ou cylindriques, de manière à ce que la partie extérieure soit plane. Les électro-aimants de levage répondent à cette catégorie (Cf. ***Figure 8*** et ***Figure 9***).

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

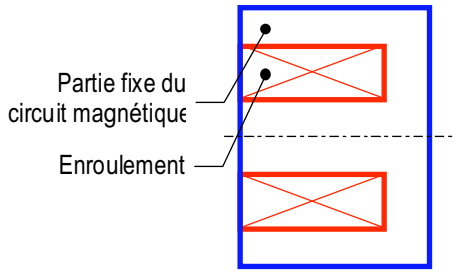


Figure 8 : électro-aimant ouvert (partie fixe seulement).

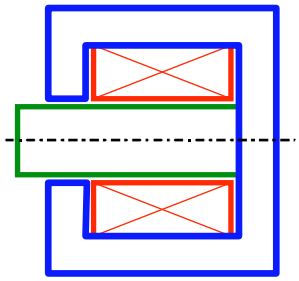


Figure 9 : avec noyau mobile.

V.2.2. Les électro-aimants en forme de U

Quatre dispositions de principe distinguent les types essentiels : armature plate (***Figure 10***), à clapet (***Figure 11***), plongeante (***Figure 12***) ou tournante (***Figure 13***). Le circuit magnétique peut être feuilleté pour minimiser les courants de Foucault (origine de pertes importantes). Ils sont principalement employés dans les relais et contacteurs.

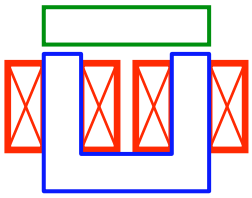


Figure 10 : armature plate.

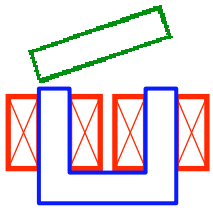


Figure 11 : armature à clapet.

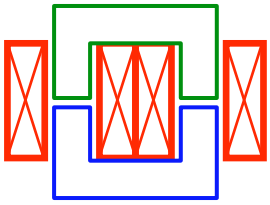


Figure 12 : armature plongeante.

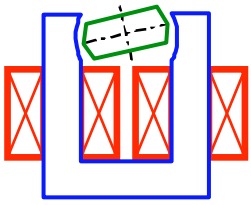


Figure 13 : armature tournante.

V.2.3. Les électro-aimants en forme de E

Les disposition principales sont à armature plate (***Figure 14***), plongeante (***Figure 15***), tournante (***Figure 16***) ou à noyau plongeant (***Figure 17***). Leur forme de E feuilletée les rend particulièrement robustes et magnétiquement moins favorables aux fuites. Leurs domaines d'emploi sont les mêmes que les électro-aimants en forme de U.

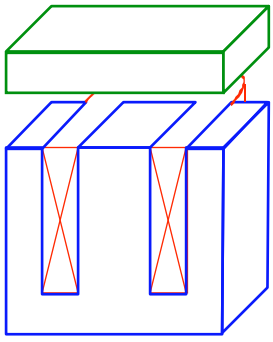


Figure 14 : armature plate.

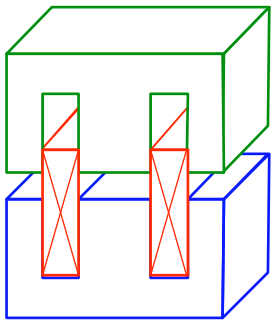


Figure 15 : armature plongeante.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

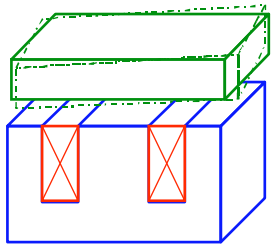


Figure 16 : armature tournante.

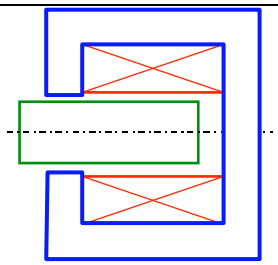


Figure 17 : noyau plongeant.

V.2.4. Les électro-aimants cylindriques

Ces électro-aimants ont souvent une armature plate (***Figure 18***) ou un noyau plongeant (***Figure 19***). Le bobinage est totalement entouré par le circuit magnétique, ce qui les rend très robustes et permet des fuites minimales). Leur géométrie rend le feuilletage impossible si bien qu'ils sont souvent réalisés en ferrite (obtention par frittage).

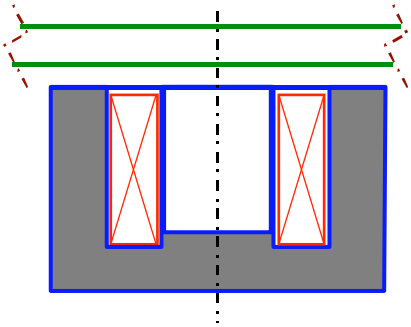


Figure 18 : armature plate.

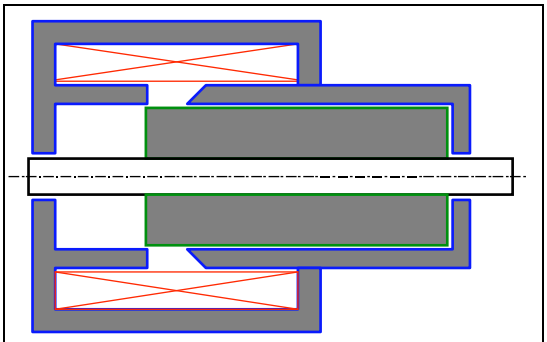


Figure 19 : noyau plongeant.

Pour de plus amples informations, il est nécessaire de se reporter aux documents des constructeurs.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر