

Chapitre VI - section 15

6.15 – Le fonctionnement du moteur à courant continu	1
6.15.1 – Le magnétisme.....	1
6.15.2 – Les bases du fonctionnement d'un moteur électrique selon « elex ».....	1
6.15.3 – La loi de Laplace.....	6
6.15.4 – L'utilisation du magnétisme	6

6.15 – Le fonctionnement du moteur à courant continu

Pour ceux qui ne pratiquent pas la vapeur vive, l'alternative est le moteur électrique pour donner du mouvement aux locomotives. Par définition, un moteur électrique est un composant « électromécanique » qui transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique. Pour cela on utilise l'interaction d'un champ magnétique¹ mobile à l'intérieur d'un champ magnétique fixe. Le fonctionnement de ce moteur mérite quelques explications.

Nous allons commencer par quelques notions de magnétisme. Puis, pour le fonctionnement de base d'un moteur électrique, le plus simple est de citer un article paru dans le journal d'initiation à l'électronique « elex »² numéro 48 d'octobre 1992.

Début de citation.

6.15.1 – Le magnétisme

Le magnétisme est la propriété de certains matériaux (le fer, le cobalt, le nickel et leurs alliages) qui lorsqu'ils sont aimantés, naturellement ou artificiellement, émettent un champ magnétique. Un aimant a un pôle nord et un pôle sud. Les pôles de même nom se repoussent, et les pôles de noms opposés s'attirent.

Sur la [figure 15.1](#) sont dessinées les « lignes de champ » du champ magnétique d'un aimant permanent. A l'extérieur elles vont du pôle nord au pôle sud. A l'intérieur, les lignes de force bouclent le circuit dans le sens sud nord, et sont parallèles à l'axe de l'aimant. Il en est de même pour une bobine parcourue par un courant électrique. C'est lignes se matérialisent lorsque l'on met de la limaille de fer autour d'un aimant.

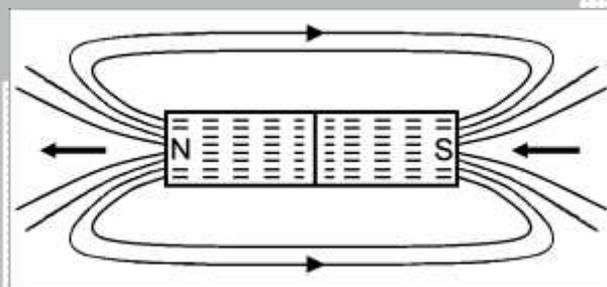


Figure 15.1- Dessin des lignes de force d'un aimant.

6.15.2 – Les bases du fonctionnement d'un moteur électrique selon « elex »

« Le phénomène qui permet à un moteur électrique de tourner est simple : il s'agit des forces d'attraction et de répulsion qu'exercent des aimants. Un conducteur quelconque, parcouru par un courant électrique, se transforme en aimant. Le passage du courant fait naître un champ magnétique autour du fil ([figure 15.2](#)).

Les lignes de force du champ sont orientées en fonction du sens du courant. C'est la règle dite du tire-bouchon qui permet de connaître cette orientation. Si nous imaginons que le tire-bouchon s'enfonce dans le fil dans le même sens que le courant, le même que celui des lignes de force du champ magnétique émis par le fil.

¹ A défaut de brûler un cierge, allumons une led en l'honneur de Messieurs Ampère, Laplace, Oersted, Gauss, Faraday, Henry et Sturgeon sans qui le moteur électrique n'existerait pas.

² Ce journal d'initiation à l'électronique, aujourd'hui disparu, revit sous la forme d'un DVD disponible chez Publitrionic.

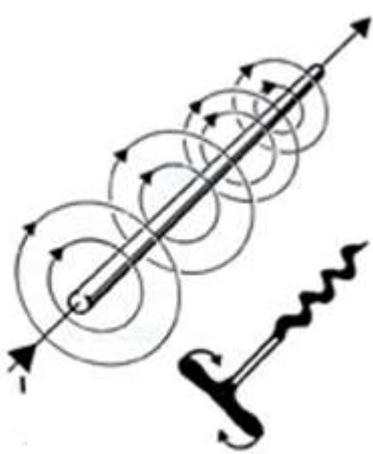


Figure 15.2 - Un champ magnétique se forme autour d'un conducteur parcouru par un courant. La règle du tire-bouchon permet de connaître l'orientation des lignes de force (source elox N° 48).

Nous savons que deux aimants exercent une force l'un sur l'autre ; ils s'attirent si les pôles opposés se font face, ou se repoussent si les pôles identiques se font face. Le fil parcouru par un courant, entouré de son champ magnétique, subit lui aussi une force¹ s'il est placé dans un autre champ magnétique, comme celui d'un aimant permanent. Le phénomène est représenté par la [figure 15.3](#) ; la partie à droite est une vue en coupe de la partie à gauche. Elle représente le champ qui se construit autour du fil, et son orientation par rapport au champ de l'aimant permanent. Sur la gauche de la figure, les champs sont de sens opposé, donc

le fil est attiré vers l'extérieur ; sur la droite, les champs sont de même signe, ce qui a tendance à repousser le fil. La force symbolisée F est la somme de l'attraction et de la répulsion que subit le fil. Une force exactement identique et de sens opposé s'exerce sur l'aimant. Si l'aimant est fixé ou assez lourd, que le fil est mobile ou assez souple, il va s'écarter vers l'extérieur de l'aimant, s'éloigner du champ magnétique. C'est ainsi que le passage du courant électrique est converti en un mouvement. Dans cette expérience, le mouvement est de très faible amplitude et la force produite inutilisable pratiquement.

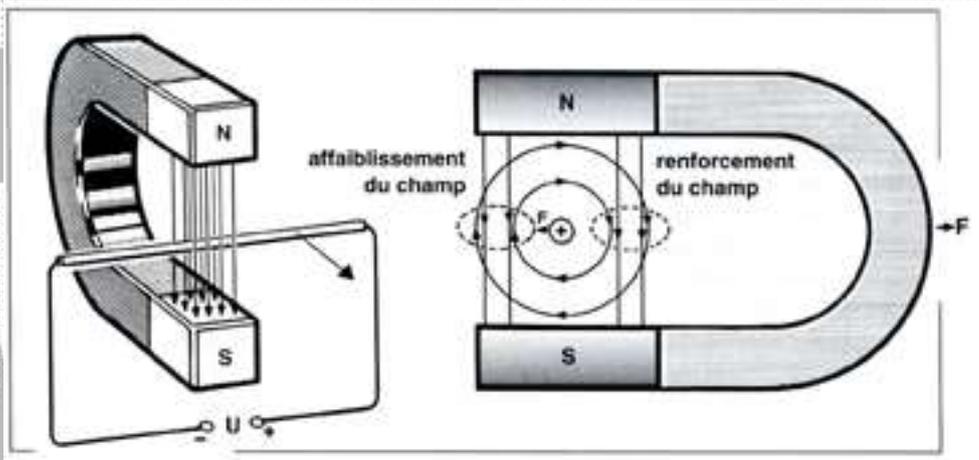


Figure 15.3 - Comme les deux champs se renforcent mutuellement à droite et s'opposent à gauche, le conducteur subit une force dirigée vers la gauche.

Le déplacement du fil cesse aussitôt qu'il se trouve en dehors du champ. Il va donc trouver une position d'équilibre, « au bord » du champ de l'aimant. Le phénomène serait plus intéressant si nous pouvions obtenir, au lieu du déplacement linéaire (la translation), un mouvement circulaire (une rotation). Dans ce cas, le fil resterait dans le champ magnétique. Tout cela est vite dit, mais la réalisation pose un certain nombre de problèmes. Pour commencer, remplaçons le fil rectiligne par un autre, courbé en épingle à cheveux. Ce fil courbé passe deux fois dans le champ de l'aimant ([figure 15.4](#)).

¹ Force de Laplace.

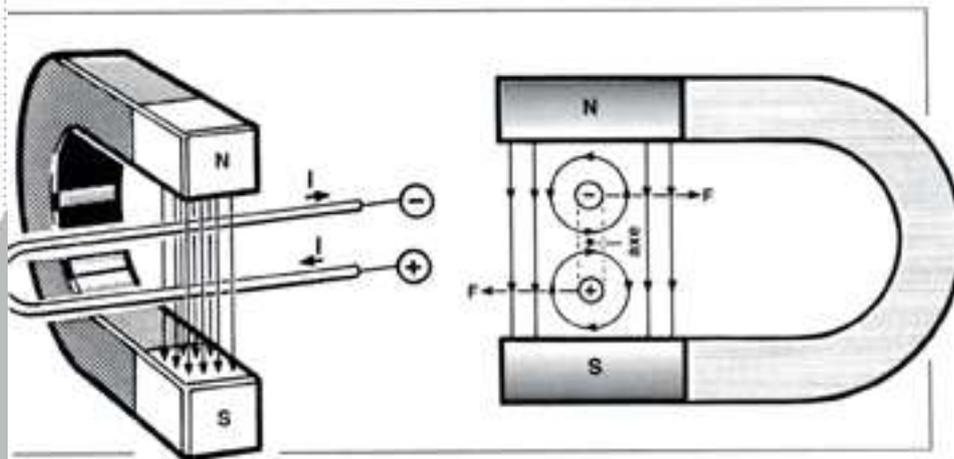


Figure 15.4 - Le fil courbé en épingle à cheveux tourne sous l'effet du champ magnétique.

Si un courant parcourt ce petit cadre, il est de sens opposé dans chaque moitié du fil : de gauche à droite dans le fil inférieur, de droite à gauche dans le fil supérieur. Les conséquences mécaniques sont faciles à déduire. La moitié inférieure va être repoussée vers l'extérieur comme dans le cas du fil simple. La moitié supérieure va être attirée vers l'intérieur puisque le courant et le champ magnétique qu'il produit sont de sens opposé. Si l'épingle est montée sur un axe passant par le milieu de l'entrefer de l'aimant, elle va tourner autour de cet axe, sous l'effet du couple de forces antagonistes (figure 15.4 à droite).

La figure 15.5a représente l'épingle sans les différentes lignes de champ. Si l'épingle est libre de se mouvoir, elle arrivera en position horizontale. À ce moment le mouvement s'arrêtera puisque les forces s'exerceront dans le plan de l'axe (figure 15.5c). Les choses en resteront là si rien ne se passe. On peut imaginer de couper le courant aussitôt que l'épingle arrive à l'horizontale.

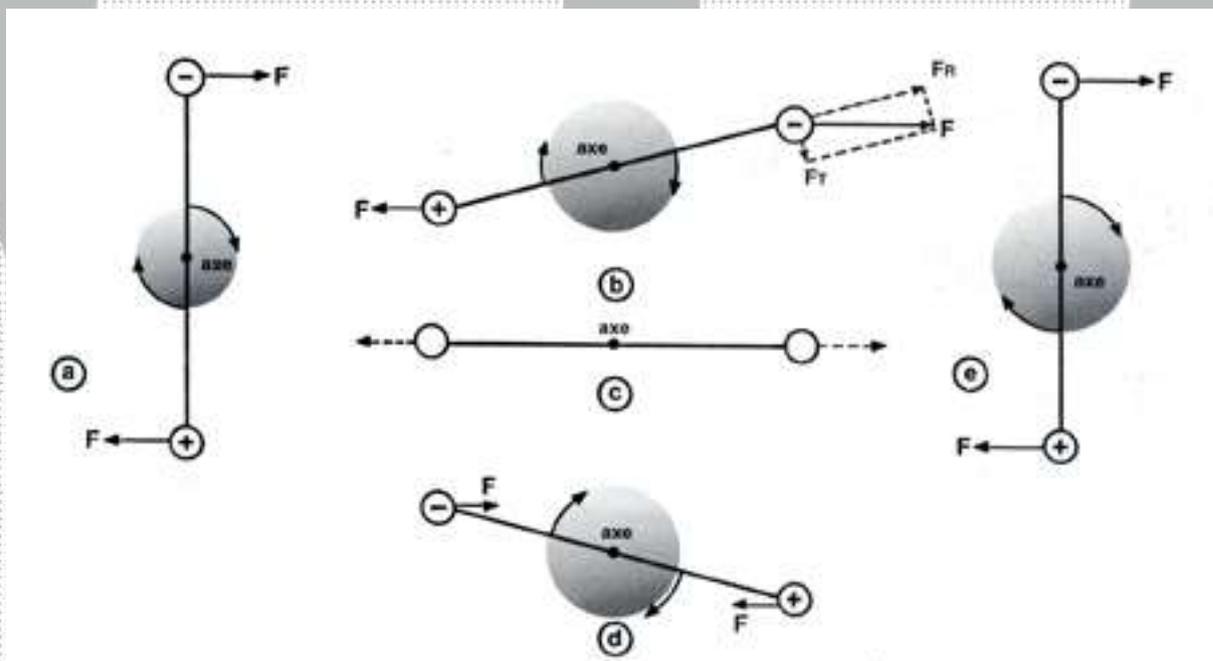
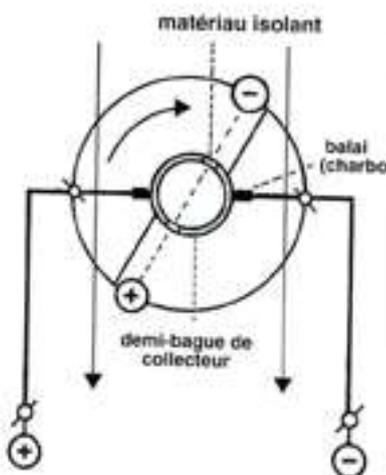


Figure 15.5 - Pour que l'épingle à cheveux tourne continuellement, il faut que le sens du courant, donc la polarité de la tension d'alimentation, change exactement au moment où le fil est dans un plan horizontal.

La force d'inertie lui permet alors de continuer sa course pour revenir dans la position d'origine. Malheureusement les forces de frottement auront tôt fait d'arrêter le mouvement, sans parler de la charge mécanique éventuelle du moteur. Pour assurer le mouvement, il faut inverser le sens du courant dans l'épingle pour créer des forces orientées dans le bon sens, à condition que la position horizontale soit légèrement dépassée (figure 15.5d). La rotation reprend pour un demi-tour, en passant par la position de la figure 15.5e (identique à celle de la figure 15.5a), pour finir comme en 15.5c. Il faut à nouveau inverser le sens du courant. Le mouvement continu, nous avons créé un moteur électrique, constitué comme les autres d'une partie fixe, le **stator**, et d'une partie mobile, le **rotor**. Nous tirons deux conclusions importantes de ce qui précède : la conversion du courant électrique en mouvement suppose qu'un fil plongé dans un champ magnétique soit parcouru par un courant ; pour que le mouvement soit continu, il faut que le sens du courant soit inversé à chaque demi-tour. Cette dernière condition peut être remplie de deux manières. La première est d'alimenter le moteur en courant alternatif. Il faut alors que l'inversion de polarité se produise au bon moment, ce qui se passe bien en pratique, car le moteur a tendance à tourner plus vite que ne le permet la fréquence de la tension alternative. Si le fil de notre moteur (figure 15.4) a dépassé l'horizontale avant l'inversion du sens du courant, les forces produites le freineront pour le « remettre au pas », le synchroniser. Avec une tension à 50 Hz comme celle du secteur, le moteur ne peut tourner qu'à la vitesse de 50 tours par seconde, soit 3000 tours par minute. Si la charge mécanique ou les frottements sont trop importants, le moteur s'arrête.



Si nous voulons alimenter notre moteur en courant continu, il faut trouver un moyen d'inverser la polarité à chaque demi-tour. Ce moyen s'appelle **collecteur**, il est représenté sur la figure 15.6. Le collecteur est constitué, pour notre rotor à deux pôles, de deux demi-bagues conductrices, isolées l'une de l'autre, montées sur l'axe du moteur. Elles sont reliées chacune à une extrémité de l'enroulement du rotor, et reçoivent le courant par deux frotteurs, les balais. Les balais sont soumis à une tension continue, leur polarité ne change pas. Ce qui change à chaque demi-tour, c'est l'extrémité de l'enroulement qui est alimentée par un balai donné.

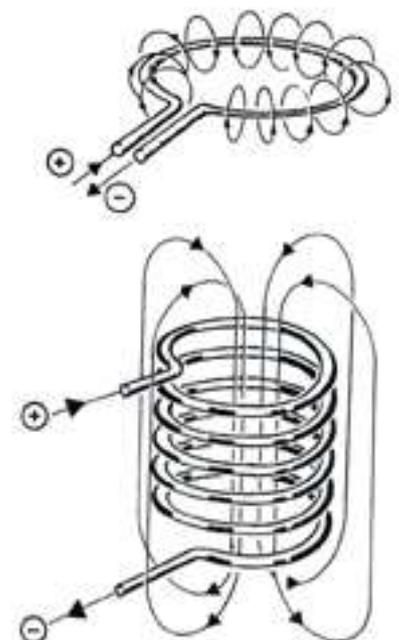
Figure 15.6 - Deux demi-bagues connectées aux extrémités de la bobine sont montées sur l'axe. Les balais, ou charbons, viennent en contact avec le collecteur qui forment ces deux demi-bagues. Cette disposition permet d'inverser la polarité au moment exact où la bobine est horizontale.

L'inversion se produit maintenant quand le rotor est exactement à l'horizontale.

L'avantage de ce moteur à courant continu par rapport à son homologue à courant alternatif est que la vitesse de rotation n'est plus liée à la fréquence de la tension d'alimentation, ni du côté des basses vitesses ni du côté des hautes vitesses. Cet avantage est lié au fait que c'est le rotor lui-même qui commande l'inversion de polarité. Le régime (ou vitesse de rotation) n'est plus déterminé que par la tension d'alimentation et la charge mécanique du moteur.

Figure 15.7 - Le champ du rotor augmente si le bobinage comporte plusieurs spires au lieu d'une seule.

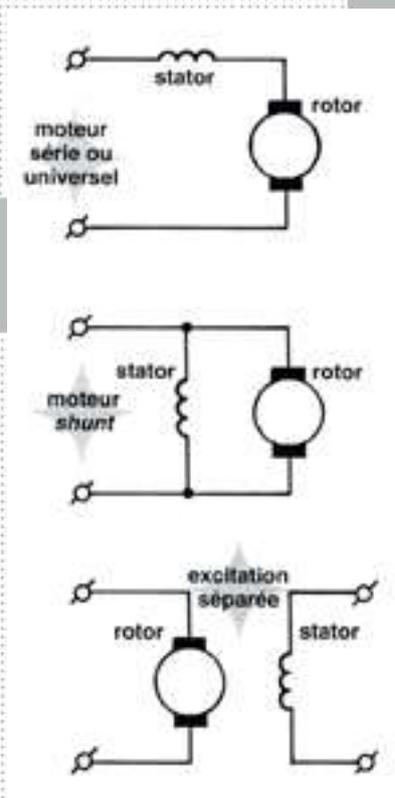
Jusqu'à présent, nous avons considéré un moteur dont le rotor est constitué d'une seule boucle, même si nous l'avons appelé enroulement. Tout le monde a déjà vu les entrailles d'un moteur électrique, que ce soit un modèle industriel ou un moteur de train miniature ; tout le monde sait donc que les enroulements ne comportent pas une spire unique. Les noyaux portent toujours une



bobine au nombre de spires important. Toutes ces spires parallèles ajoutent les champs qu'elles produisent, pour former un champ total beaucoup plus important (figure 15.7). On peut se demander pourquoi un champ plus intense est nécessaire, alors que le moteur peut tourner avec une seule spire. En fait, il ne suffit pas que le moteur tourne, il faut aussi qu'il dispose de la force nécessaire pour entraîner autre chose. La force que produit le moteur (le **couple**) est d'autant plus importante que sont intenses les champs magnétiques qui produisent les forces d'attraction et de répulsion. On pourrait aussi produire un champ plus intense en augmentant l'intensité du courant qui traverse l'enroulement. Cette équivalence est utilisée, entre autres, pour définir les bobines de relais : le champ magnétique nécessaire pour attirer la palette mobile ou le contact à lames souples est mesuré en ampères-tours. Une bobine de 1000 spires traversée par un courant de 1 milliampère produit le même effet qu'une « bobine » à une seule spire parcourue par un courant de 1 ampère. La construction d'un moteur résulte d'un compromis entre le nombre de spires qu'on peut loger sur le noyau, la section et la résistance du fil, l'intensité disponible, la tension d'alimentation...

La force produite par les champs magnétiques dépend autant du champ du rotor, que nous venons d'examiner, que de celui du stator, qu'il est beaucoup plus difficile de faire varier. Les aimants puissants et de grandes dimensions sont difficiles à fabriquer, et forcément coûteux. Ils sont remplacés dans les gros moteurs par des électro-aimants, d'autres enroulements. Le champ nécessaire est obtenu aussi facilement que pour le rotor. Les deux éléments, rotor et stator, peuvent être connectés de trois façons différentes à la source d'alimentation. Ils peuvent être reliés en série, en parallèle, ou alimentés par des sources séparées (figure 15.8).

Les avantages et inconvénients de préférer l'un ou l'autre pour chaque peut être alimenté aussi bien en autre appellation de **moteur** (que les moins de vingt ans ne l'électricité était distribuée par des pas de normalisation sur la tension nature (continu ou alternatif), sur moteur série) présente l'autre maximal à l'arrêt, ce qui le destine le moteur universel peut-il alternatif que sur courant continu ? par le sens relatif des champs du inversons le sens du courant, ce qui changeront de sens en même resté le même, le sens de rotation convaincre, essayez de changer sur les flèches qui indiquent un champ, produisent du même côté, la force parallèle ou shunt s'accommode mais supporte moins bien que le vitesse par variation de tension. Il important à vitesse élevée.



chaque type de moteur font type d'application. Le moteur série continu qu'en alternatif, d'où son **universel** qui remonte à un temps peuvent pas connaître) où sociétés indépendantes. Il n'y avait (110 V, 127 V, 220 V), sur la le nombre de phases... Il (le avantage de développer son couple à la traction de véhicules. Pourquoi fonctionner aussi bien sur courant Le sens de rotation est déterminé stator et du rotor. Si nous sont les deux champs magnétiques temps ; comme leur sens relatif ne change pas. Pour vous en la figure 15.3b le sens de toutes l'addition et la soustraction se a le même sens. Le moteur aussi d'une tension alternative, moteur série la commande de fournit en revanche un couple plus

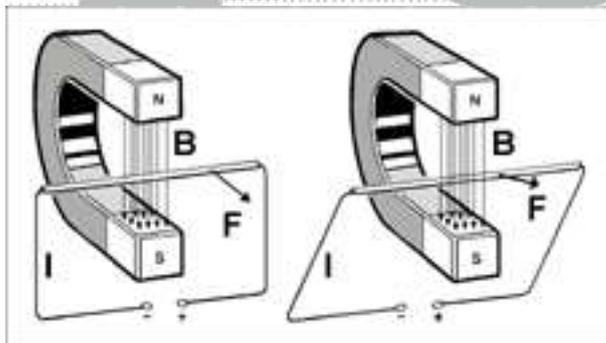
Figure 15.8- Il existe trois façons de raccorder les enroulements des électroaimants d'un moteur électrique. Dans les deux premiers types, un changement de polarité n'a pas d'influence sur le sens de rotation ; ces moteurs peuvent donc être alimentés par un courant alternatif. Le troisième type, à excitation séparée, permet une inversion du sens de rotation par l'inversion de polarité sur le rotor seulement ou sur le stator seulement.

Le moteur à excitation séparée est comparable au moteur à aimant permanent : le champ du stator, même s'il est variable, est de sens constant. Cette caractéristique permet de commander le changement de sens de rotation en inversant la polarité de l'alimentation.

Revenons pour finir à la [figure 15.5](#). Chaque fil est soumis à une force horizontale qui peut se décomposer, pour presque toutes les positions du cadre, en deux autres forces : une force radiale FR dirigée de l'axe de rotation vers l'extérieur, et une force perpendiculaire au rayon (tangente au cercle) FT . Seule la force tangente au cercle sert à mettre le rotor en mouvement, la force radiale tend seulement à écarter les fils l'un de l'autre ou à les rapprocher ([figure 15.5b et 5d](#)). La force utile, celle qui fait tourner le moteur, est maximale dans les positions a et e, minimale dans les positions b et d (nous supposons que le rotor n'est pas alimenté dans la position c). L'ingénieur qui conçoit un moteur cherchera donc à avoir toujours le rotor dans la position que nous appelons verticale. Malheureusement, ce n'est pas possible avec une seule bobine. C'est pourquoi la plupart des moteurs que vous pouvez trouver comportent un minimum de trois **pôles**, quelquefois huit ou douze. Cette multiplication des pôles permet d'avoir toujours au moins un pôle du rotor dans la position la plus favorable. Naturellement, le collecteur comporte un nombre de plages conséquent, les balais restant le plus souvent au nombre de deux. Plus le nombre de pôles est grand, plus régulière est la rotation, plus faciles les démarrages ».

Fin de citation.

6.15.3 – La loi de Laplace¹



La **force de Laplace** est la force « F » perpendiculaire au champ magnétique « B » de l'aimant permanent qui s'exerce sur le fil parcouru par le courant électrique « I » et tend à le faire sortir du champ. Si on inverse le sens du courant, ou le sens du champ magnétique, la force est à l'opposé.

Figure 15.9 – La force de Laplace.

Pour augmenter la force de Laplace on augmente donc « I » ou « B », sachant que lorsque l'on augmente l'intensité, le fil s'échauffe, et les pertes par effet Joules

augmentent.

Règles d'orientation avec les trois doigts de la main droite :

- pouce : sens de la force de Laplace
- index : sens du courant
- majeur : sens du champ magnétique.

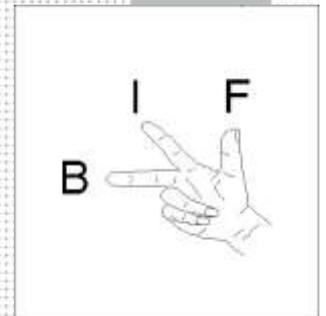
Figure 15.10 – Règle des trois doigts.

6.15.4 – L'utilisation du magnétisme en modélisme

En modélisme ferroviaire, nous utilisons le magnétisme dans :

- le moteur entraînant la locomotive
- le solénoïde commutant la position d'une aiguille
- le haut-parleur
- le transformateur (hors sujet)
- le relais
- etc.

Nous parlerons du haut-parleur dans la [section 6.17](#) du [présent chapitre](#), le moteur de locomotive fait l'objet de la [section suivante](#). Il reste à évoquer le solénoïde.



¹ Pierre Simon marquis de-Laplace, 1749-1827.

Le solénoïde est un enroulement régulier de fil en hélice formant une bobine de longueur appropriée à la puissance désirée. L'intérieur creux contient un barreau de ferrite : le piston. Cette bobine, parcourue par un courant, crée un champ magnétique qui attire le piston et le tire vers le centre de la bobine. Le piston circule dans un sens ou dans l'autre en fonction du sens de l'alimentation. L'usage typique en modélisme est le mécanisme de déplacement de la partie mobile d'une lame d'aiguille.

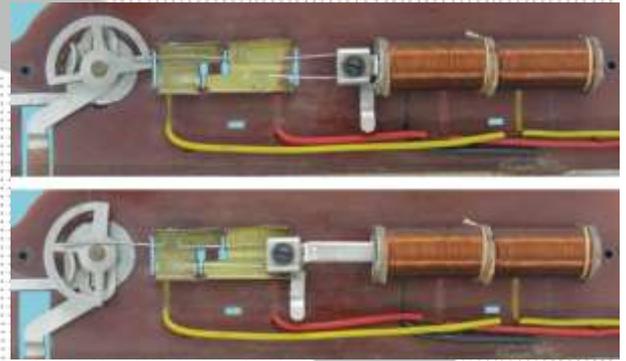


Figure 15.11 – Les deux positions d'un solénoïde d'aiguille.

Les moteurs d'aiguille font l'objet de la [section 5.13](#) du [chapitre 5](#).

Les relais sont décrits dans la [section 6.27](#) du [présent chapitre](#).

INDEX

fonctionnement d'un moteur électrique 6.151	magnétisme qu'est que c'est ? 6.15.....1
loi de Laplace, champ magnétique 6.15.....6	moteur électrique fonctionnement d'un ... 6.15.1
magnétisme en modélisme 6.15.....6	