

1 Rappels : électrocinétique

1.1 Électrons

Les charges mobiles sont les électrons. L'unité de charge est le coulomb (C). Un coulomb correspond à $6,2 \times 10^{18}$ électrons. Donc, un électron vaut $1,602 \times 10^{-19}$ coulomb. Le symbole de la charge est q .¹

$$C = 6,2 \times 10^{18} e^- \quad (1)$$

1.2 Intensité

L'intensité électrique (I) est un débit d'électrons (q) par unité de temps (t). L'unité de l'intensité est l'Ampère (A), qui correspond à un coulomb par seconde.² Dans un circuit en série, l'intensité est identique en tout point du circuit.

$$I = \frac{q}{t} \quad (2)$$

1.3 Différence de potentiel ou tension

La tension (U) correspond à la quantité d'énergie (E) transportée par charge (q). Plus la tension est importante, plus les électrons ont tendance à se mouvoir pour égaliser les charges. Une augmentation de la tension permettra donc de mettre en mouvement les électrons même en cas de forte résistance (arc électrique dans l'air, par exemple). L'unité de la tension est le volt (V).³

$$U = \frac{E}{q} \quad (3)$$

1.4 Énergie électrique

De part l'équation 3, l'énergie électrique correspond au produit du nombre de charges par la différence de potentiel. L'unité de l'énergie électrique est le joule (J), qui correspond au produit des volts par des coulombs.⁴

$$E = U \times q \quad (4)$$

1.5 Résistance

La résistance électrique (R) est une grandeur exprimant la tendance de tout matériau à « freiner » le flux d'électrons. Elle est définie par le rapport de la tension (U) par l'intensité (I). L'unité de la résistance est le ohm (Ω) qui correspond au rapport des volts sur les ampères.⁵

$$R = \frac{U}{I} \quad (5)$$

1. Charles-Augustin Coulomb (1736-1806) est un officier, ingénieur et physicien français. Il est passé à la postérité pour la formulation précise des lois du frottement solide, et pour l'invention du pendule de torsion, dynamomètre de précision qui lui permit de formuler la loi d'attraction entre solides électrisés.

2. André-Marie Ampère (1775-1836) est un mathématicien, physicien, chimiste et philosophe français.

3. Alessandro Volta (1745-1827), est un physicien italien. Il est connu pour ses travaux sur l'électricité et pour l'invention de la première pile électrique, appelée pile voltaïque.

4. James Joule (1818-1889) est un physicien anglais. Son étude sur la nature de la chaleur et sa découverte de la relation avec le travail mécanique l'ont conduit à la théorie de la conservation de l'énergie.

5. Georg Simon Ohm (1789-1854) est un physicien allemand ayant trouvé la relation de proportionnalité entre l'intensité électrique, la tension et la résistance.

1.6 Puissance

La puissance (P) est l'énergie (E) développée par unité de temps (t). L'unité de la puissance est le watt (W).⁶

$$P = \frac{E}{t} \quad (6)$$

Suivant 6, 4 et 2, on peut montrer que :

$$P = U \times I \quad (7)$$

Le watt (W) est donc le produit des ampères (A) par des volts (V).

2 Force électrique

Deux charges s'attirent si elles sont de signes opposés et se repoussent si elles sont de signes identiques. Les charges négatives correspondent à des surplus d'électrons. Les charges positives correspondent à des déficits en électrons ou à des ions positifs dans les solutions aqueuses.

2.1 Attraction des charges

Un électroscope permet de mettre en évidence les différences de charges entre objets.

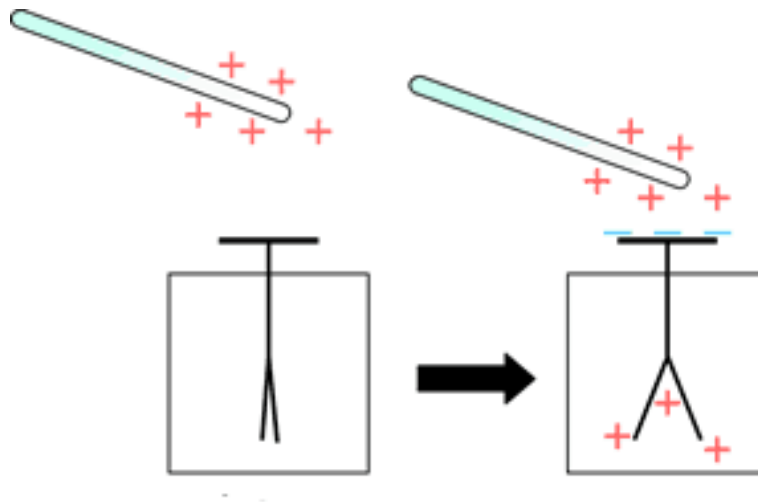


FIGURE 1 – Electroscopie

La force exercée est proportionnelle aux charges en interaction suivant la formule.

$$F_e = k_{el} \frac{q_1 \times q_2}{d^2} \quad (8)$$

où :

- k_{el} est la constante électrique qui vaut $9.10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$ dans l'air et le vide.
- q_1 et q_2 sont le nombre de charges
- d est la distance entre les charges

Une force positive signifiera donc une répulsion, tandis qu'une force négative une attraction.

6. James Watt (1736-1819) est un ingénieur écossais dont les améliorations sur la machine à vapeur ont permis son utilisation industrielle (trains, moteur, ...).

2.2 Champ électrique

Un champ, dans le domaine de la physique, est un espace où s'exerce des forces. Un champ électrique est donc le lieu où s'exerce les forces d'attraction ou de répulsion des charges électriques. Plus on s'approche des charges, plus ces forces sont importantes. Plus on s'en éloigne, plus elles diminuent.

Le volt par mètre (symbole : V/m), ou newton par coulomb (N/C), est l'unité de mesure SI de la force électrique d'un champ électrique, C'est l'intensité du champ électrique exerçant une force de 1 newton sur une charge électrique de 1 coulomb.

2.3 Cage de Faraday

Une cage de Faraday est un dispositif qui permet d'annuler le champ électrique en son centre. Il s'agit d'une enceinte circulaire dont le contour est conducteur ce qui a pour conséquence d'égaliser le champ électrique, et donc que le champ électrique soit nul en son centre.⁷

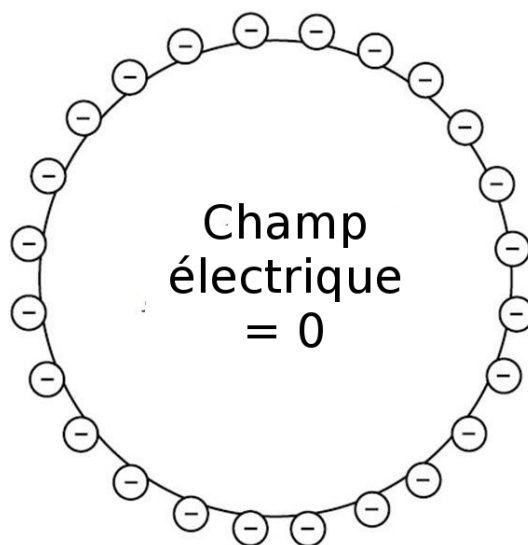


FIGURE 2 – Le principe de la cage de Faraday

2.4 Sphère, pointe et conductivité de l'air

Une sphère conductrice aura naturellement tendance à répartir ces charges d'électrons de façon homogène à sa surface et donc à annuler le champ électrique en son centre. C'est donc la meilleure forme pour conserver l'électricité statique.

A l'inverse, une pointe conductrice chargée produira une singularité à son extrémité où le champ électrique sera extrême. En effet, les électrons ne pourront se répartir uniformément dans ce type de géométrie. Il s'agira donc d'un point de fuite de l'électricité statique.

L'air a une très faible conductivité électrique⁸. On peut donc considérer que la résistance de l'air est infinie. Cependant, au-delà d'une certaine tension, un arc électrique (un flux d'électrons) se produira. Cet arc se produira à $36000V/cm$ dans de l'air sec et à $10000V/cm$ dans de l'air humide.

7. Michael Faraday (1791-1867) était un physicien anglais connu pour ses travaux fondamentaux dans le domaine de l'électromagnétisme, l'électrochimie, le diamagnétisme, et l'électrolyse.

8. La conductivité (C) est l'inverse de la résistivité

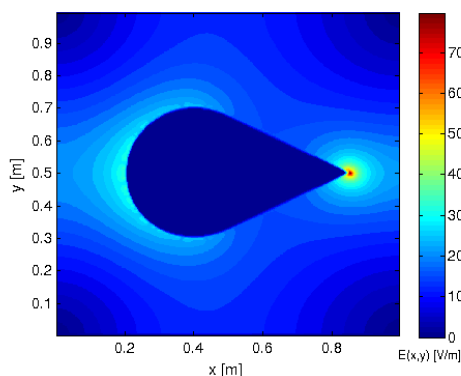


FIGURE 3 – Le champ électrique sur une pointe

2.5 Mesures de protection

2.5.1 Prise de terre

Tout appareil constituée de métal ou tout autre matériau capable de stocker de l'électricité statique doit être raccordé à une prise de terre. La prise de terre est un câble relié au sol qui permet de dissiper d'éventuels surplus de charges.

2.5.2 Paratonnerre

Un paratonnerre⁹ est un dispositif pointu conducteur relié à la terre permettant de capter la foudre. De ce fait, il canalise le flux d'électrons en évitant qu'il ne traverse les bâtiments.

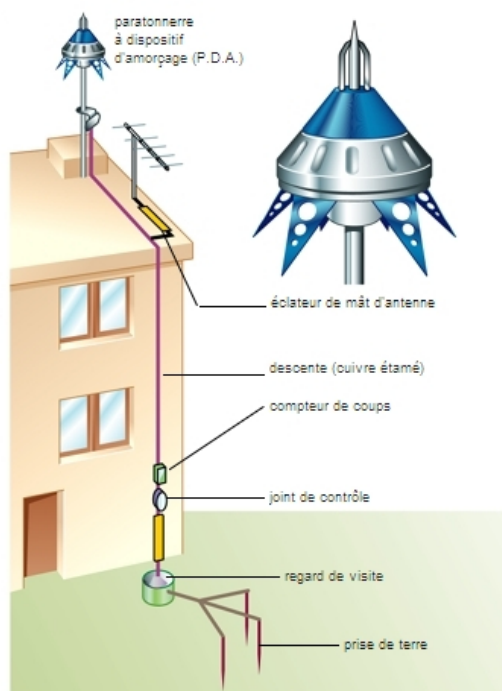


FIGURE 4 – Un paratonnerre (larousse.fr)

9. Ce terme peut paraître ambigu puisque le tonnerre est le bruit émis par l'éclair, tandis que la foudre est l'éclair lui-même. Mais le terme « parafoudre » est réservé à des systèmes plus complexe permettant de réguler la tension (des sur-tenseurs) et donc d'éviter aussi l'effet de la foudre.

3 Force magnétique

La force magnétique est la force produite par le mouvement des électrons. et non leur charge. Pratiquement, comme il sera rare de pouvoir distinguer l'effet électrique de l'effet magnétique, on parlera de force électro-magnétique.

3.1 Les aimants

Le mot « aimant » trouve son origine à Magnésie (aujourd'hui Manisa, près de Izmir en Turquie) vers 600 av. J-C où Thales de Milet signala l'existence de pierres ayant la propriété de pouvoir agir à distance sur le fer. Il s'agissait d'aimants naturels constitués d'oxyde de fer appelé « magnétite ». Les aimants ont deux pôles : un pôle nord et un pôle sud. En utilisant deux aimants, on peut observer que le pôle nord de l'un et le pôle sud de l'autre s'attirent mutuellement. Par contre, un même type de pôle se repousse. Les propriétés magnétiques des aimants sont dus à la présence de certains atomes comme le fer, le nickel ou le néodyme. Tous les atomes sont « magnétiques » au niveau microscopique. On peut expliquer les propriétés macroscopiques des aimants par l'alignement des orbitales électroniques. Dans un matériau non-magnétique, les orbitales électroniques sont aléatoires et ne sont pas alignées spatialement. Le magnétisme généré par un atome est annulé par le magnétisme en sens contraire des atomes l'entourant.

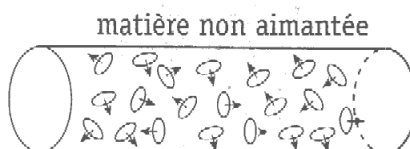


FIGURE 5 – Modélisation d'un matériel non-magnétique

Dans un matériau magnétique, l'alignement des orbitales électroniques produit un renforcement du magnétisme de chaque atome. Le magnétisme global correspond à un mouvement électronique « comme si » un flux électronique tournait à sa surface.

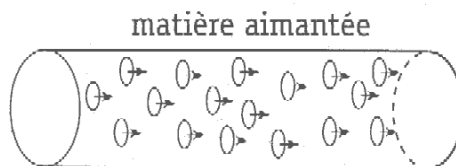


FIGURE 6 – Modélisation d'un matériel magnétique

3.2 Champ magnétique

Si on place un aimant à proximité de limaille de fer, on peut observer que cette limaille se disposera selon des lignes précises. On appelle ces lignes des « lignes forces ». Les lignes de forces permettent de

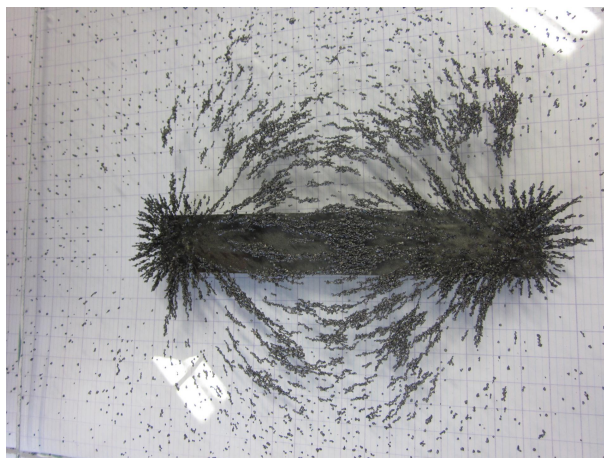


FIGURE 7 – Les lignes de force autour d'un aimant

visualiser le champ magnétique. Elles suivent en effet l'orientation des forces magnétiques. Prés d'une barre aimantée rectiligne, le champ magnétique suivra des lignes courbes qui entoureront la barre, comme représenté au schéma 8. Si on utilise un aimant en fer à cheval, le champ magnétique sera

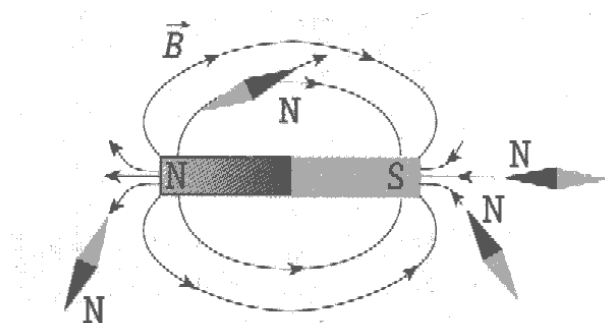


FIGURE 8 – Les lignes de force autour d'un aimant

rectiligne et uniforme dans l'entrefer (comme représente au schéma 9), ce qui facilitera les calculs.

L'unité du champ magnétique (B) est le Tesla (T). Il correspond à une force d'un newton produit par un ampère à un mètre de distance ($\frac{N}{A \times m}$). Le Tesla correspond donc dans le système international à $\frac{kg}{A \times s^2}$.¹⁰ Le Tesla est donc une unité très grande. On utilisera souvent le milliTesla (mT) ou le microTesla (μT).

¹⁰. Nikola Tesla (1856-1943) est un inventeur et ingénieur d'origine serbe naturalisé américain (en 1891). Il a principalement œuvré dans le domaine de l'électricité, mais était également ingénieur mécanique.

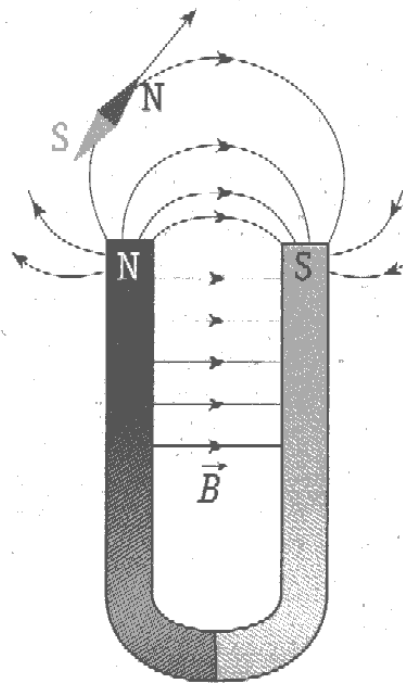


FIGURE 9 – Les lignes de force autour d'un aimant en fer à cheval

3.3 Magnétisme terrestre

La Terre émet un magnétisme. Ce magnétisme trouve son origine dans le noyau externe liquide de la Terre composé à 80 % de fer en fusion. En effet, les mouvements de convection (variation de température) de ce liquide allié à l'inertie due à la rotation de la Terre sur elle-même génère une circulation d'électrons au sein du noyau externe. Cette circulation d'électrons produit donc un magnétisme. Le magnétisme terrestre est similaire à un énorme aimant positionné en son centre. Il existe un faible décalage de approximativement 6 degrés qui varie avec le temps entre l'axe de rotation de la Terre et son « axe magnétique ». Ceci permet d'utiliser une boussole (qui n'est qu'une barre aimantée sur un point de rotation) qui va s'aligner sur les lignes de forces du magnétisme terrestre et donc donner l'orientation du nord.

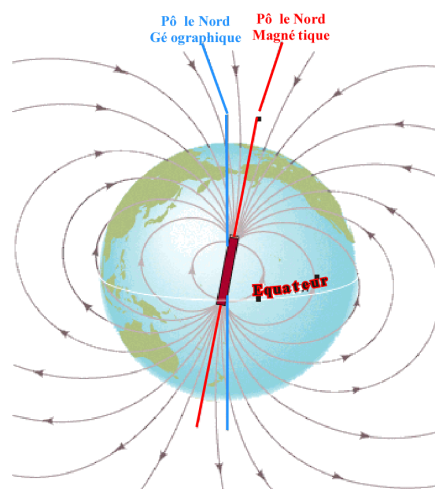


FIGURE 10 – La Terre vue comme un aimant.

3.4 Magnétisme induit

Si un flux d'électrons génère un champ magnétique, cela vaut aussi pour un fil de cuivre conduisant l'électricité. On peut donc générer un champ magnétique en faisant passer un courant électrique. Si l'on fait passer un courant dans un fil électrique, on peut observer qu'une boussole au-dessus du fil s'alignera perpendiculairement au fil. On peut en conclure que le passage d'un courant induira

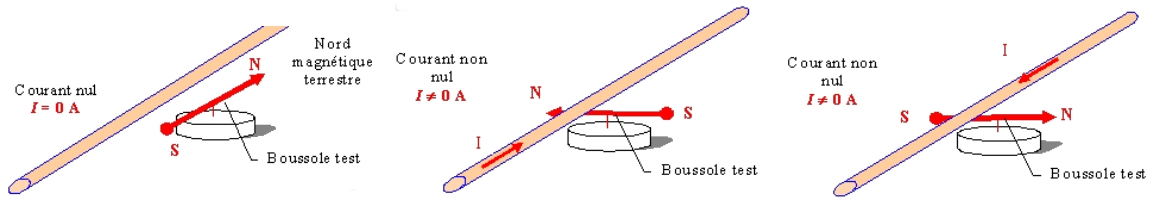


FIGURE 11 – Effet d'un courant continu sur une boussole.

un champ magnétique opposé au sens conventionnel (du + vers le -), et dans le même sens que l'orientation physique des électrons (du - vers le +).

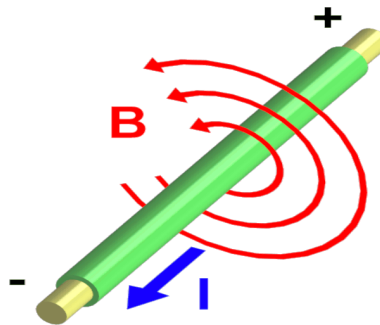


FIGURE 12 – Génération d'un champ magnétique par un courant continu.

Dans un solénoïde, le passage d'un courant induira un champs magnétique qui sera orienté suivant les pôles électriques et le sens de bobinage du solénoïde.

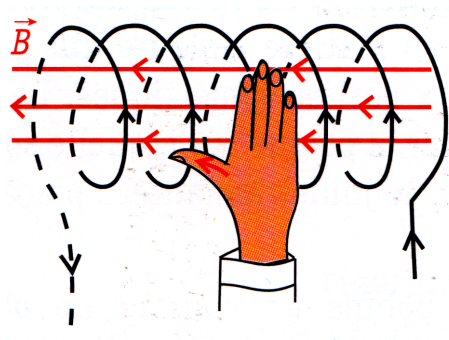


FIGURE 13 – Génération d'un champ magnétique par un courant continu dans un solénoïde.

Tout comme, en rapprochant 2 aimants, on induit une force ; si l'on génère un champ magnétique avec un courant induit à proximité d'un aimant, une force se produit (cfr 14). Si le champs magnétique est uniforme (fer à cheval), alors la force pourra être calculée par la formule 9.

$$\vec{F} = \vec{B} \times \vec{I} \times l \quad (9)$$

où :

- F est la force magnétique
- B est le champ magnétique
- I est l'intensité du courant

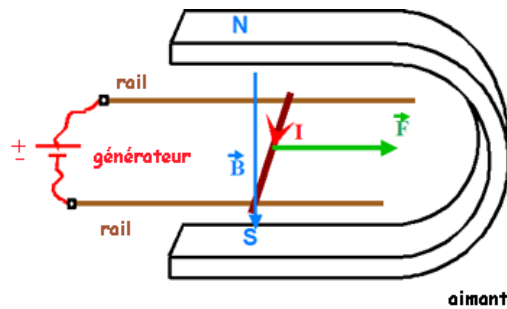


FIGURE 14 – Force induite par un courant continu et un aimant.

Le $\vec{}$ dans la formule signifie que les grandeurs sont orientées. L'orientation des grandeurs est donnée par la « règle de la main droite » dans le schéma 15, où :

- la force est le pouce ;
- le champ magnétique (du pole nord vers le pole sud) est le majeur ;
- le courant électrique (du + vers le -) est l'index (intensité).

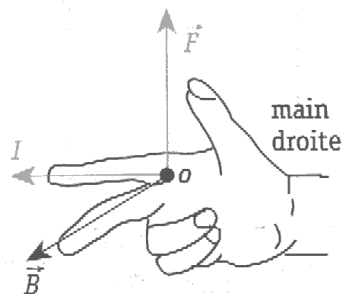


FIGURE 15 – Règle de la main droite.

Si l'on préfère le sens physique du mouvement des électrons (du - vers le +), on peut utiliser la « règle de la main gauche » qui est totalement similaire.

3.5 Les électro-aimants ou le magnétisme induit

Si l'on désire augmenter le champ magnétique induit, il suffit d'augmenter la longueur du conducteur en ne modifiant pas la distance par rapport à l'aimant. La solution est donc d'enrouler le conducteur. Le résultat est une « bobine », appelée solénoïde.¹¹

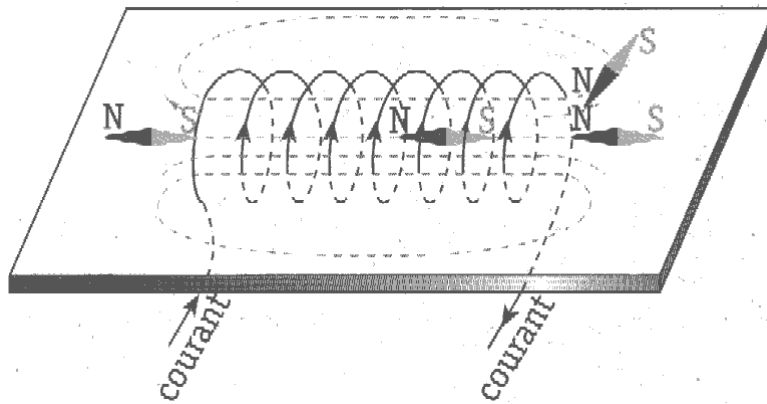


FIGURE 16 – Champ magnétique généré par un solénoïde.

La valeur du champ magnétique d'un solénoïde est donnée par la formule 10.

$$B = \mu \times I \times \frac{N}{l} \quad (10)$$

- μ est la perméabilité magnétique qui vaut $4\pi \cdot 10^{-7} T \frac{m}{A}$ dans l'air et $6,3 \cdot 10^{-3} T \frac{m}{A}$ pour le fer ;
- I est l'intensité électrique (en Ampères) ;
- N est le nombre de spires ;
- l est la largeur de la bobine (en mètres).

3.6 Les moteurs à courant continu

Si une force est produite par le passage d'un courant, on peut créer un système pour créer une force en rotation autour d'un axe, c-à-d un moteur électrique.

Le moteur électrique le plus simple est le moteur électrique à courant continu. Il s'agit d'un cadre conducteur mobile dont l'alimentation se fait par de simples contacteurs. Par soucis de simplicité, dans les schémas ci-dessous, on considérera que le cadre n'a qu'une seule spire. Dans la réalité, afin d'augmenter le champ magnétique un nombre important de spire sera utilisé.

Dans une première étape, sur base de la règle de la main droite, le segment $A - B$ est soumis à une force orientée perpendiculaire au plan et le « transperçant » (vers l'intérieur) et les segments $C - D$ est soumis à une force orientée perpendiculaire au plan et « ressortant » (vers l'extérieur) (cfr. 17). Ces deux forces poussent dans un sens de rotation identique. Après un certain temps (étape 2), le segment $A - B$ se trouve à la position de $C - D$ et inversement.

Du fait des contacteurs qui inversent l'alimentation du cadre, en étape 2, le cadre $C - D$ subit une force orientée perpendiculaire au plan et le « transperçant » (vers l'intérieur), tandis que le cadre $A - B$ est soumis une force orientée perpendiculaire au plan et « ressortant » (vers l'extérieur). Ceci contribue à maintenir la rotation du cadre, ce qui remettra les deux segments à leur position initiale et cela indéfiniment.

11. le solénoïde sera en fil de cuivre vernis, pour éviter les contact lors de l'enroulement

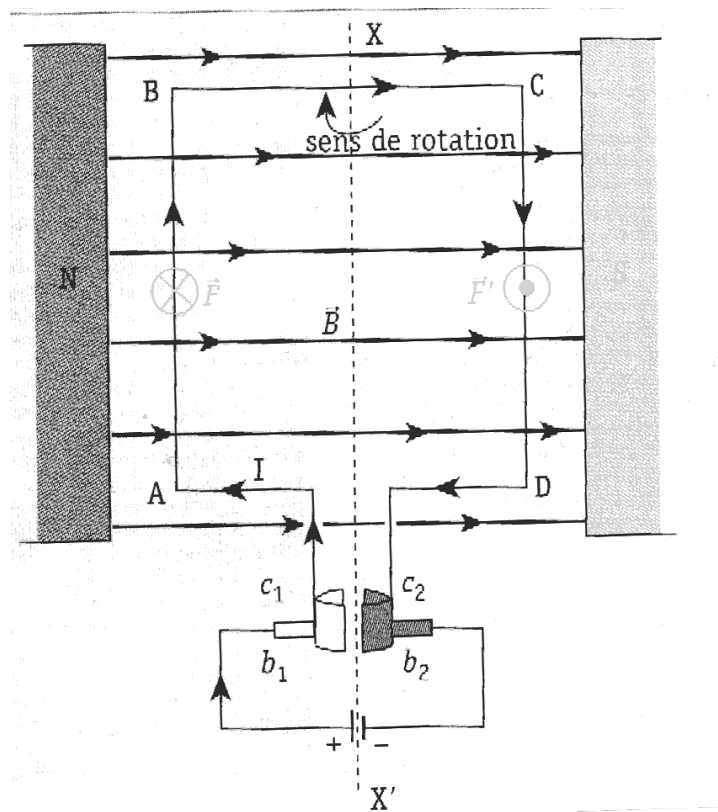


FIGURE 17 – Modèle d'un moteur électrique : étape 1.

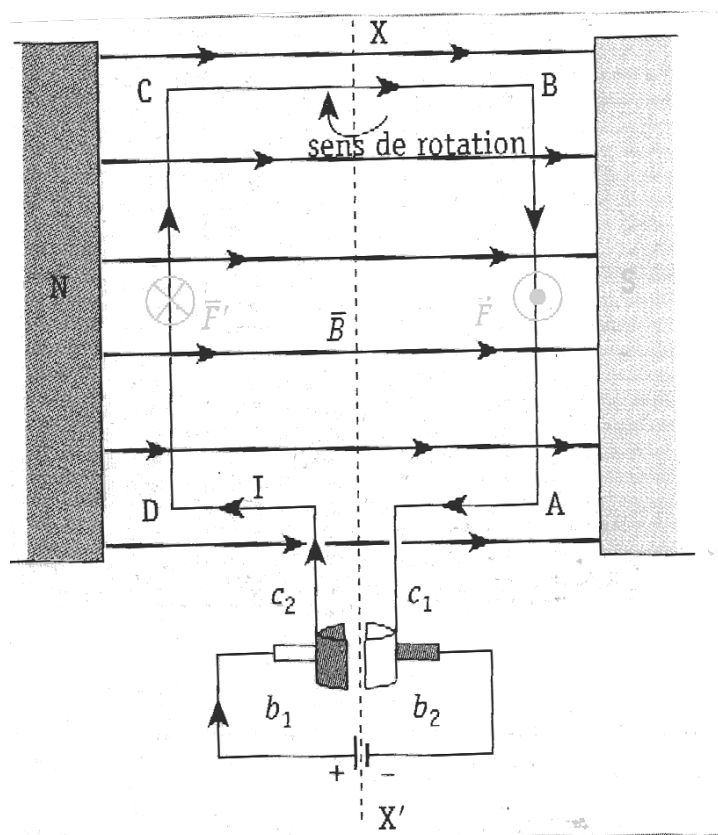


FIGURE 18 – Modèle d'un moteur électrique : étape 2.

Table des matières

1	Rappels : électrocinétique	1
1.1	Électrons	1
1.2	Intensité	1
1.3	Différence de potentiel ou tension	1
1.4	Énergie électrique	1
1.5	Résistance	1
1.6	Puissance	2
2	Force électrique	2
2.1	Attraction des charges	2
2.2	Champ électrique	3
2.3	Cage de Faraday	3
2.4	Sphère, pointe et conductivité de l'air	3
2.5	Mesures de protection	4
2.5.1	Prise de terre	4
2.5.2	Paratonnerre	4
3	Force magnétique	5
3.1	Les aimants	5
3.2	Champ magnétique	6
3.3	Magnétisme terrestre	7
3.4	Magnétisme induit	8
3.5	Les électro-aimants ou le magnétisme induit	10
3.6	Les moteurs à courant continu	10