

# Précis d'Électrotechnique

**Christophe Palermo**

Maître de conférences, IUT de Montpellier-Sète,  
Institut d'Électronique et des Systèmes, université de Montpellier

**2<sup>e</sup> édition**

**DUNOD**

Illustration de couverture : © Bosca78 – istockphoto.com

Cet ouvrage est également publié sous le titre *Électrotechnique*  
dans la collection « Parcours IUT »

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
	

© Dunod, 2018, nouvelle présentation 2022

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-084653-5

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>o</sup> et 3<sup>o</sup> a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Principes, grandeurs et mesure</b>	<b>1</b>
1.1	Notions d'électromagnétisme . . . . .	1
1.2	Notions d'électricité . . . . .	25
1.3	Énergie et puissance . . . . .	65
1.4	Machines électriques tournantes . . . . .	78
<b>2</b>	<b>La machine à courant continu</b>	<b>95</b>
2.1	Définition . . . . .	95
2.2	Principe de fonctionnement . . . . .	95
2.3	Technologie de la machine à courant continu . . . . .	102
2.4	Fonctionnement de la machine à courant continu . . . . .	106
2.5	La machine à courant continu en mode moteur . . . . .	110
2.6	La machine à courant continu en mode génératrice . . . . .	131
2.7	Avantages et inconvénients de la machine à courant continu . . . . .	147
<b>3</b>	<b>Le transformateur monophasé</b>	<b>151</b>
3.1	Généralités sur le transformateur . . . . .	151
3.2	Le transformateur parfait (ou idéal) . . . . .	161
3.3	Le transformateur réel . . . . .	167
3.4	Bilan énergétique et rendement . . . . .	176
<b>4</b>	<b>Systèmes triphasés équilibrés</b>	<b>185</b>
4.1	Généralités . . . . .	185
4.2	Systèmes triphasés équilibrés . . . . .	188
4.3	Couplage des récepteurs triphasés . . . . .	193
4.4	Les puissances dans les récepteurs triphasés . . . . .	206
4.5	Production et distribution de courants triphasés . . . . .	228
<b>5</b>	<b>L'alternateur synchrone</b>	<b>235</b>
5.1	Présentation . . . . .	235

## Table des matières

5.2	Principe de fonctionnement . . . . .	236
5.3	Technologie de l'alternateur synchrone . . . . .	239
5.4	Fonctionnement de l'alternateur synchrone . . . . .	243
5.5	Alternateur en production . . . . .	259
5.6	Fonctionnement en moteur . . . . .	266
<b>6</b>	<b>Le moteur asynchrone</b>	<b>273</b>
6.1	Caractéristiques du moteur asynchrone . . . . .	273
6.2	Le moteur asynchrone triphasé en fonctionnement . . . . .	279
6.3	Freinage du moteur asynchrone . . . . .	293
6.4	Aperçu du moteur asynchrone monophasé . . . . .	296
<b>7</b>	<b>Éléments de sécurité électrique</b>	<b>301</b>
7.1	Le réseau public . . . . .	301
7.2	Les causes du risque électrique . . . . .	304
7.3	Risques et protection des matériels . . . . .	305
7.4	Risques et protection des personnes . . . . .	309
7.5	Risque de non-disponibilité de l'énergie . . . . .	323

# Principes, grandeurs et mesure

La maîtrise de l'énergie constitue un enjeu tous les jours plus important. Quand on parle d'énergie et que l'on se projette dans l'avenir, il ne faut pas longtemps pour que l'énergie électrique nous vienne à l'idée. Pourtant, l'électricité n'est pas ce que l'on appelle une énergie primaire : il n'existe pas de gisement d'énergie électrique et, pour en disposer, il faut la produire, ou plutôt la convertir à partir d'une source mécanique, chimique ou lumineuse par exemple. De même, on n'utilise pas l'énergie électrique directement. La seule présence d'un courant ne permet pas de chauffer une pièce ou de déplacer une charge. Mais parallèlement à cela, l'électricité constitue le meilleur vecteur énergétique connu. En France, chaque jour, un réseau d'environ 100 000 km constitués de câbles conducteurs dont la section dépasse pas  $10 \text{ cm}^2$  transporte la même quantité d'énergie que des milliers de citernes de fioul, en un clin d'oeil, et sans que personne n'ait besoin de se déplacer.

Le domaine des sciences et techniques qui traite l'ensemble des applications de l'électricité en tant qu'énergie, depuis la production jusqu'à l'utilisation, en passant par le transport et la distribution, s'appelle l'**électrotechnique** et constitue le sujet de cet ouvrage. Moteurs, alternateurs, génératrices, machines tournantes, lignes à haute tension et autres transformateurs font partie de son vocabulaire. Parmi les disciplines qu'il met en jeu, nous porterons une attention particulière à l'électromagnétisme, l'électricité et la mécanique. Nous proposons dans ce chapitre d'aborder différentes notions qui nous permettront de décrire et de comprendre les thèmes abordés.

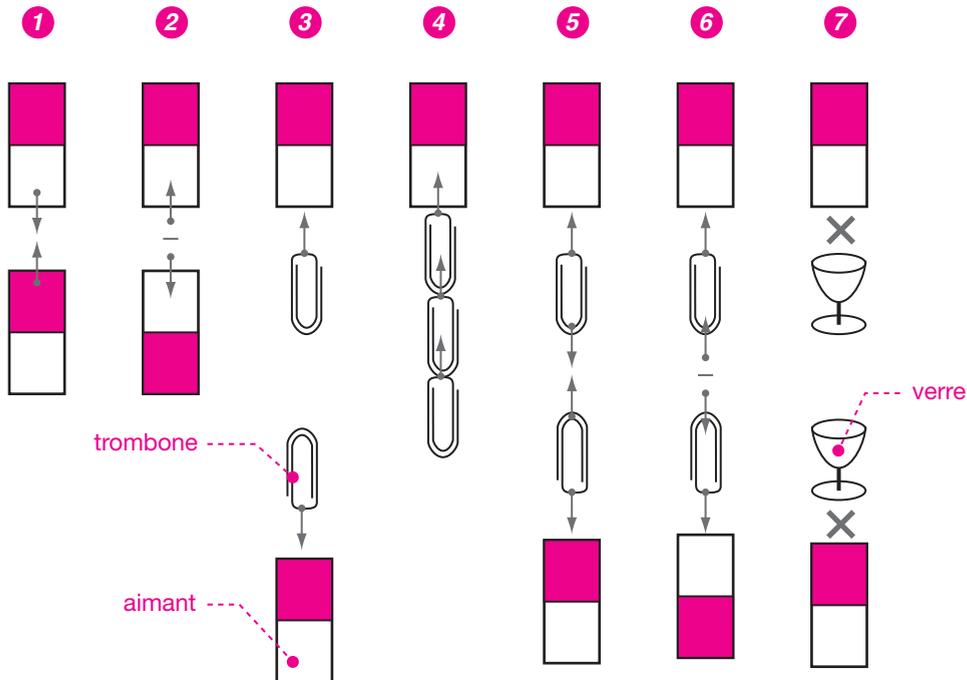
## 1.1 NOTIONS D'ÉLECTROMAGNÉTISME

Les phénomènes électromagnétiques constituent la clé de voûte de la production et de la conversion de l'énergie électrique. Pour comprendre toute leur importance, nous en donnons quelques notions dans cette section.

### 1.1.1 Observations préalables : les aimants

Les aimants sont vieux comme le monde, et cette faculté qu'a la pierre de Magnésie, qui a donné son nom au magnétisme, de pointer dans la direction du nord est connue des hommes depuis près de dix siècles. Les enfants voient en eux les sources d'une force mystérieuse : qui n'a pas été intrigué dès son plus jeune âge par ces objets

capables de s'accrocher sur les réfrigérateurs, d'attirer des trombones, de s'attirer et de se repousser entre eux, mais qui restent de marbre devant le plastique, le bois, le verre, et même certains conducteurs tels que l'aluminium ? La figure 1.1 dresse un panorama succinct de ce qu'un physicien en herbe peut observer en jouant avec des aimants, et nous en donnons ci-après la description et quelques interprétations.



**Figure 1.1** – Quelques observations possibles avec des aimants, des trombones et des verres.

1. En plaçant deux aimants dans une certaine configuration, on observe qu'ils s'attirent puis se collent l'un à l'autre en choisissant un alignement qu'il est impossible de leur imposer. Lorsque les aimants sont lourds, il peut même être difficile de les séparer.
2. Si l'on retourne l'un des deux aimants, les deux aimants qui dans un premier temps s'attiraient se repoussent maintenant. Il est d'autant plus difficile de les contraindre à se toucher que les aimants sont lourds. On définit alors deux pôles : le pôle nord et le pôle sud<sup>1</sup>. Deux pôles différents s'attirent alors que deux pôles de même nature se repoussent.

---

1. Le choix du nom des pôles est dû aux boussoles, première application des aimants.

Si on leur en laisse la possibilité, les aimants qui se repoussent vont se positionner différemment, choisissant une configuration semblable à celle du point 1 avant de se coller par deux pôles de différentes natures.

3. Si l'on approche un aimant d'un trombone, quel que soit le pôle présenté, alors l'aimant attire le trombone, qui se colle à lui.
4. Le trombone, attiré et collé à l'aimant au point 3, a la faculté d'attirer un autre trombone. L'aimantation est donc transmise au trombone, et il a à son tour la possibilité de la transmettre à un autre trombone. Toutefois :
  - le pouvoir d'attraction du dernier trombone accroché diminue à mesure que le nombre de trombones aimantés augmente ;
  - les trombones ainsi aimantés perdent la faculté d'attirer d'autres trombones si le contact avec l'aimant est rompu.
5. D'une part, deux trombones aimantés par des pôles différents s'attirent...
6. ... et d'autre part, deux trombones aimantés par des pôles de même nature se repoussent. L'aimantation s'est transmise en conservant les pôles.
7. Les aimants n'attirent ni le verre, ni le papier, ni le bois, ni le plastique, ni même certains métaux conducteurs comme par exemple l'aluminium ou le cuivre. L'aimantation est donc une propriété de la matière, et l'on peut classer les matériaux dans différentes catégories (voir le paragraphe d) de la page 11).

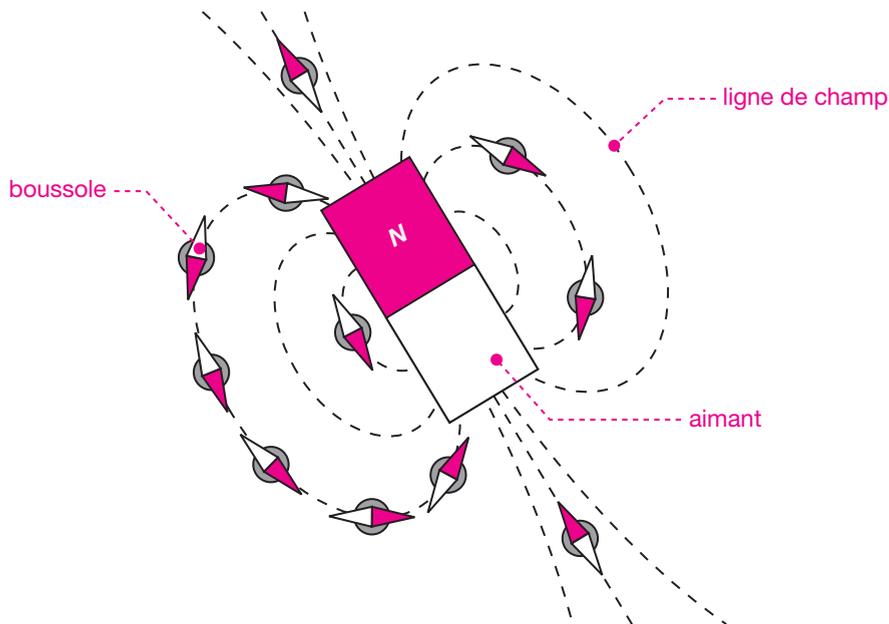
### 1.1.2 Grandeurs magnétiques

#### • Observation

Une observation intéressante peut être faite à l'aide d'un aimant et d'une boussole, comme reporté sur la figure 1.2. Dans cette expérience, l'aimant est beaucoup plus lourd que l'aiguille de la boussole, qui est par ailleurs elle aussi un aimant. L'aiguille a la possibilité de s'orienter sous l'effet de l'aimant. En revanche, son effet sur l'aimant, du fait de la différence d'échelle et de poids entre les deux objets, est négligeable : on ne fait pas bouger l'aimant en déplaçant la boussole.

On observe essentiellement deux choses :

- la boussole change d'orientation en fonction de sa position. L'axe de la boussole décrit des lignes qui vont d'un pôle de l'aimant à l'autre. Il existe donc une force qui contraint l'aiguille à s'aligner, et cette force peut être appréhendée à l'aide des lignes décrites ;
- si l'on s'intéresse aux pôles de la boussole, on remarque que, systématiquement, son pôle nord pointe vers le pôle sud de l'aimant alors que son pôle sud pointe vers le pôle nord de l'aimant. Tout se passe donc comme si les lignes sortaient du pôle nord de l'aimant pour rentrer dans le pôle sud.



**Figure 1.2** – Lignes de champ générées par un aimant maintenu fixe. Les boussoles, plongées dans le champ magnétique, réagissent en conséquence et s'alignent.

On peut montrer, même si ce n'est facile à observer dans l'expérience en question, que les forces magnétiques appliquées sur l'aiguille de la boussole sont d'autant plus intenses que les lignes sont resserrées. C'est en effet sur les pôles de l'aimant que le champ magnétique est le plus intense.

• *Autres expériences possibles*

Les phénomènes que nous venons de décrire peuvent aussi être observés avec de la limaille de fer : celle-ci, en tombant autour de l'aimant, se magnétise et agit comme une multitude de petites boussoles. Elle décrit exactement les mêmes lignes que celles décrites par la boussole. En revanche, si l'on remplace la limaille de fer par des fibres plastiques, on ne remarque aucune orientation particulière : l'aimant n'a dans ce cas aucun effet.

Il existe une force qui impose un alignement aux objets magnétiques. Les caractéristiques de cette force magnétique dépendent de la nature des objets et de leurs positions relatives.

## a) Le champ magnétique

### • Approche pragmatique

Dans l'expérience (2) de la figure 1.1 (page 2), à condition d'avoir des aimants de tailles comparables, on observe que les deux aimants cherchent à s'orienter pour s'aligner différemment. On comprend alors que tout objet magnétique engendre et subit les forces magnétiques. À partir de la notion de forces, essayons de définir la notion de champ magnétique. Pour cela, au lieu de regarder les deux aimants indistinctement, choisissons de nous placer dans le référentiel de l'un des deux, de considérer en quelques sortes qu'il fait partie du paysage, et même qu'il le modèle en créant les conditions qui feront réagir n'importe quel objet magnétique se trouvant à sa portée. C'est ce que nous avons fait dans l'exemple de la figure 1.2 où nous avons considéré comme négligeables les effets de la boussole sur l'aimant : l'aimant a en quelques sortes peint un tableau de lignes, la boussole ne faisant que s'adapter à ces dernières. Ces lignes ne sont donc pas des lignes de force mais des **lignes de champ**. Plus précisément, ce sont les lignes du champ magnétique créé par l'aimant.

Le champ magnétique est une grandeur permettant de décrire les interactions magnétiques. Son utilisation revient à considérer que la source du champ est responsable de l'interaction et que les cibles la subissent.

Lorsque l'on remplace la boussole par la limaille de fer, le tableau reste le même et la limaille s'y adapte à son tour en suivant les lignes. Par contre, lorsque l'on saupoudre le paysage de fibres plastiques, ce dernier ne suit pas les lignes, parce qu'il ne s'agit pas d'un matériau magnétique.

Le comportement d'un matériau plongé dans un champ magnétique dépend de la nature du matériau.

### • Propriétés du champ magnétique

Le champ magnétique est un vecteur, noté  $\vec{B}$ . En un point donné,  $\vec{B}$  a la direction qu'y indiquerait l'aiguille d'une boussole, comme indiqué sur la figure 1.3. Le sens de  $\vec{B}$  s'obtient alors en faisant pointer  $\vec{B}$  vers le nord qu'indique la boussole. L'intensité du champ magnétique s'exprime en teslas (T) dans le système international.

La notion de champ s'applique au cas de plusieurs sources. On considère alors que toutes ces sources créent les conditions de l'interaction. Le champ magnétique en tout point de l'espace est alors la somme des champs magnétiques dus aux différentes sources, comme indiqué sur la figure 1.4.

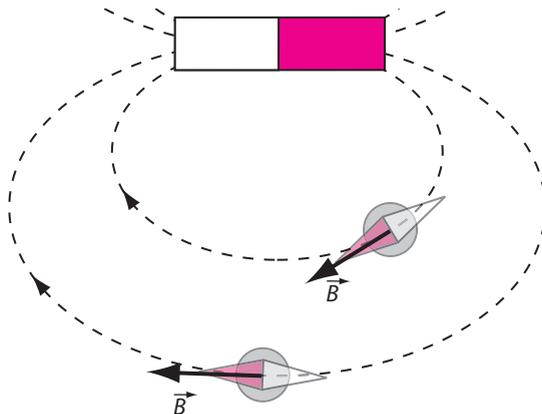


Figure 1.3 – Champ magnétique et ligne de champ.

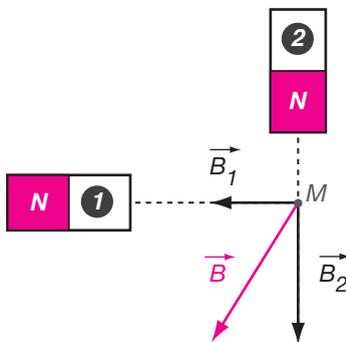
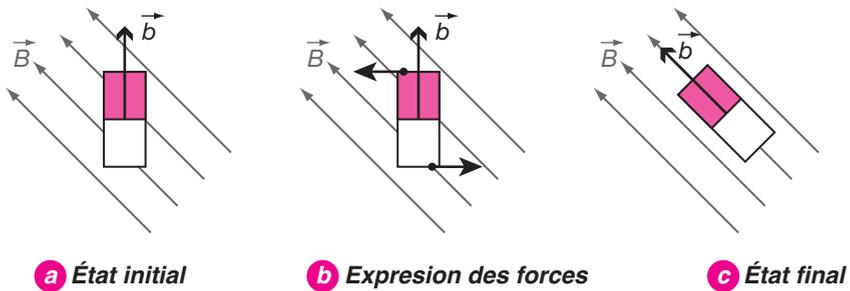


Figure 1.4 – Champ magnétique créé au point  $M$  par deux aimants permanents. Le champ  $\vec{B}$  est la somme vectorielle des champs  $\vec{B}_1$  et  $\vec{B}_2$  créés par les aimants 1 et 2, respectivement.

• Description de l'interaction magnétique

Voyons à présent comment le champ magnétique permet de prévoir l'interaction magnétique. Pour cela, appuyons-nous sur la figure 1.5 et supposons qu'un aimant mobile soit plongé dans un champ magnétique  $\vec{B}$ , comme le montre le volet (a). On associe à cet aimant le vecteur champ magnétique  $\vec{b}$  situé dans son axe. Les forces magnétiques agissent alors sur l'aimant (voir volet (b)) afin de contraindre le champ  $\vec{b}$  à s'aligner avec le champ local  $\vec{B}$  (voir volet (c)). Remarquons que les forces qui s'expriment sont d'autant plus grandes que les champs  $\vec{B}$  et  $\vec{b}$  sont intenses et que l'angle entre  $\vec{B}$  et  $\vec{b}$  est important.



**Figure 1.5** – Expression de la force magnétique sur un aimant plongé dans un champ magnétique  $\vec{B}$ . (a) On associe à l'aimant le champ magnétique  $\vec{b}$ . (b) Un couple de forces magnétiques agit sur l'aimant (c) afin d'aligner les champs  $\vec{B}$  et  $\vec{b}$ .

Les forces magnétiques agissent de manière à aligner les champs magnétiques des objets en interaction.

Si l'objet plongé dans le champ  $\vec{B}$  n'est pas aimanté, c'est-à-dire s'il ne génère pas de champ magnétique, alors les forces magnétiques n'agissent pas parce qu'il n'y a pas de champ à aligner. C'est ce qu'il se passe lorsque l'on saupoudre de fibres plastiques un aimant.

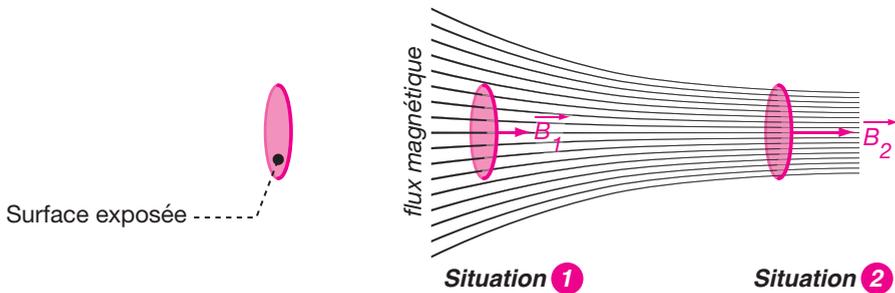
## b) Les lignes de champ

En nous appuyant sur la figure 1.3, nous pouvons donner deux caractéristiques d'une ligne de champ :

- une ligne de champ est orientée, elle sort du pôle nord et rentre au pôle sud ;
- la tangente en tout point d'une ligne de champ, orientée dans le sens de la ligne, représente le champ magnétique en ce point.

De plus, si les lignes de champ sont fortement liées au champ magnétique, elles représentent une grandeur mesurable à part entière, qui est le *flux magnétique*. Le flux magnétique est exprimé en webers (Wb), et se mesure avec un fluxmètre ; nous le notons  $\phi$  dans cet ouvrage. En tout point de l'espace, le champ magnétique n'est autre que la **densité de flux magnétique** par unité de surface, ce qui explique que, lorsque les lignes de champ sont plus resserrées, la densité de flux est plus grande et le champ magnétique plus important, comme indiqué sur la figure 1.6. Dans ce schéma, les lignes de champ représentent le flux magnétique et traversent la même surface dans deux situations. Dans la situation 2, les lignes sont plus resserrées et la

densité de lignes traversant la surface est plus importante que dans la situation 1. Le champ  $\vec{B}_2$  est alors plus intense que le champ  $\vec{B}_1$ .

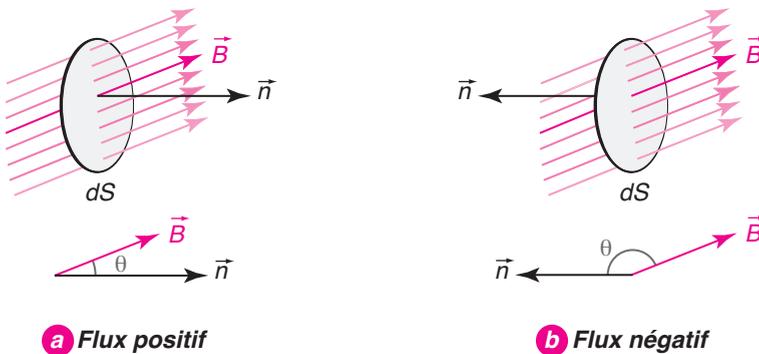


**Figure 1.6** – Flux magnétique, densité de flux et champ magnétique. La surface exposée est la même dans les deux situations.

Le champ est plus intense là où les lignes de champ sont plus resserrées.

### c) Le flux magnétique

Explicitons le lien quantitatif existant entre le champ et le flux magnétique. Pour cela, calculons le flux  $d\phi$  traversant la surface élémentaire<sup>2</sup>  $dS$  dans la situation reportée sur la figure 1.7.



**Figure 1.7** – Surface élémentaire  $dS$  de normale  $\vec{n}$  soumise à un champ magnétique  $\vec{B}$ . Le signe du flux dépend du sens de  $\vec{n}$ .

2. Une surface élémentaire est une surface choisie suffisamment petite pour être considérée comme plane.

- *Orientation de la surface*

La première étape pour calculer le flux magnétique est d'orienter la surface par le biais de sa normale  $\vec{n}$ .

La normale à une surface est un vecteur unitaire qui lui est perpendiculaire.

Si la norme unitaire et la direction de  $\vec{n}$  sont imposées, aucune indication n'est donnée sur son sens : il y a donc deux façons de choisir la normale. Le sens de  $\vec{n}$  peut être choisi de façon totalement arbitraire : on peut choisir le sens que l'on souhaite sans que cela n'entraîne d'erreur d'interprétation des résultats (il n'y a pas de « bon sens » et de « mauvais sens »). Ceci étant, lorsque la surface considérée tapisse un volume, on oriente par convention la normale vers le côté convexe.

- *Expression du flux*

Le flux magnétique élémentaire  $d\phi$  traversant la surface  $dS$  est donné par le produit scalaire

$$d\phi = \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot dS \quad (1.1)$$

Si l'on appelle  $\theta$  l'angle que forment  $\vec{B}$  et  $\vec{n}$ , on peut remplacer le produit scalaire par une multiplication et exprimer l'intensité du flux magnétique comme

$$d\phi = B \cdot dS \cdot \cos \theta \quad (1.2)$$

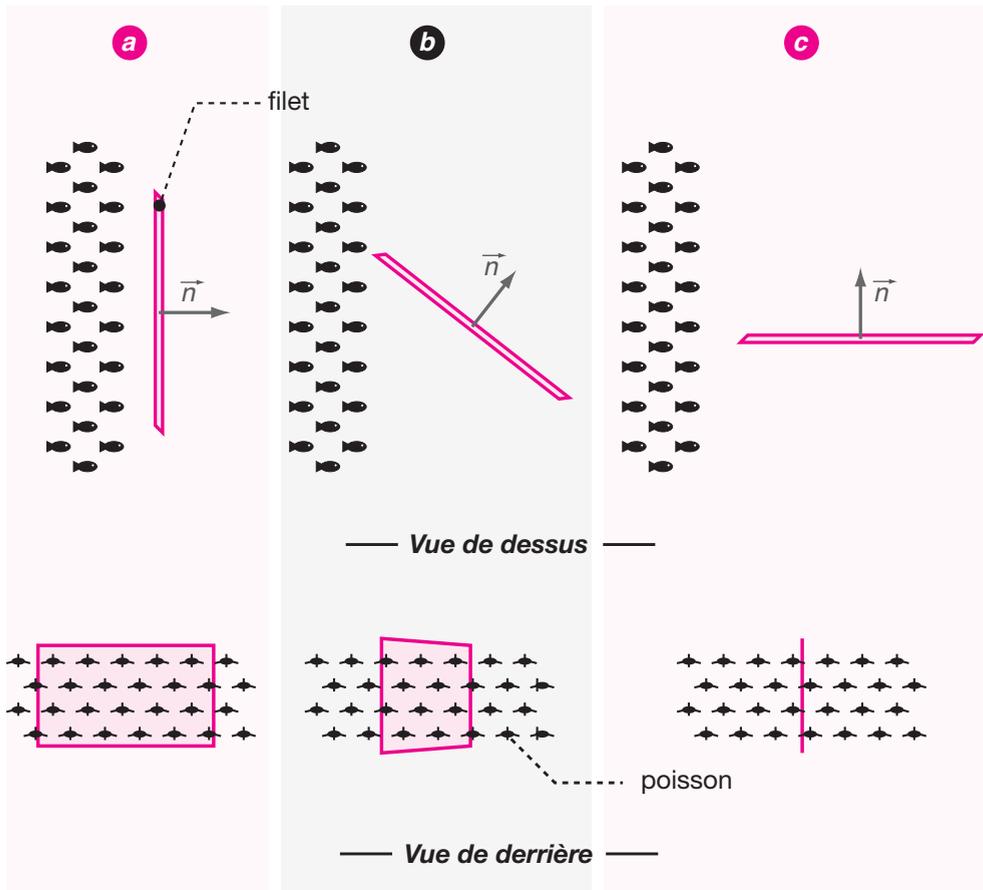
Pour connaître le flux traversant une surface non-plane  $S$ , il suffit de sommer tous les flux élémentaires traversant toutes les surfaces élémentaires  $dS$  composant  $S$ , ce qui s'écrit à l'aide d'une intégrale :

$$\phi = \int_S d\phi \quad (1.3)$$

- *Représentation imagée*

Pour comprendre quelles sont les grandeurs influençant le flux magnétique, comparons son calcul à celui d'un flux de poissons se faisant prendre par un filet, comme représenté sur la figure 1.8. Le flux magnétique  $\phi$  est alors assimilé au flux des poissons en mouvement, et la surface  $dS$  est celle du filet. Évaluer le flux magnétique revient alors à compter le nombre de poissons se faisant prendre dans le filet.

- Plus la surface du cadre est grande, plus le flux de poissons se précipitant dans le filet est important : plus la surface exposée au champ magnétique est grande, et plus le flux magnétique est important. C'est le sens du terme  $dS$  dans les relations (1.1) et (1.2).



**Figure 1.8** – Analogie du flux magnétique à travers une surface avec un flux de poissons à travers un cadre. Le plan du cadre est (a) perpendiculaire au déplacement des poissons, (b) placé dans une configuration quelconque, puis (c) parallèle au déplacement des poissons.

- De la même manière, si la densité de poissons est plus importante (ce qui correspond à des lignes de champ plus serrées), la quantité de poissons traversant la surface du filet et se faisant piéger est plus grande.
- L'angle d'incidence du flux de poissons (ou l'orientation du filet) influence aussi le nombre de poissons capturés. Celui-ci est maximal lorsque le plan du filet est perpendiculaire au déplacement des poissons (volet (a) de la figure 1.8), c'est-à-dire lorsque la normale au filet lui est parallèle. À l'inverse, si l'on fait pivoter le filet (volet (b) de la figure), le flux diminue.

pour devenir nul lorsque le plan du filet est parallèle au déplacement des poissons (volet (c) de la figure) puisque, dans ce dernier cas, plus aucun poisson ne pénètre dans le filet.

C'est le sens du produit scalaire de la relation (1.1), et du  $\cos \theta$  de la relation (1.2).

On remarque que le signe de  $d\phi$  dépend du sens choisi pour  $\vec{n}$  : en effet,  $\cos \theta$  change de signe tous les demi-tours. Nous verrons à la page 23 que cela n'a pas d'importance, parce que les effets du flux magnétique sont eux aussi quantifiés par rapport à  $\vec{n}$ .

### d) Les matériaux magnétiques

#### • Classification

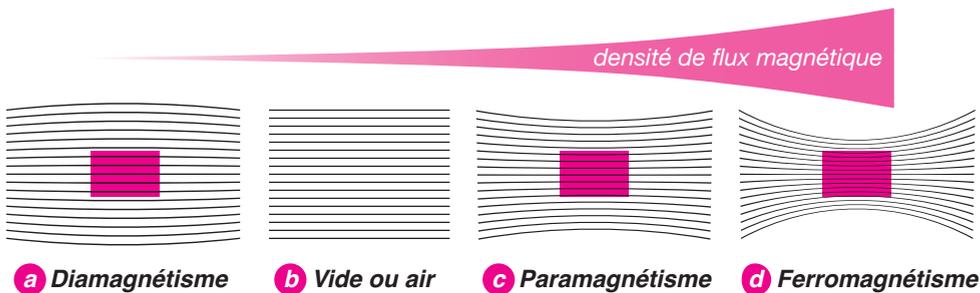
Nous avons vu à la page 2 que tous les matériaux ne réagissent pas de la même manière en présence d'un aimant. Certains sont attirés et s'aimantent à leur tour, d'autres semblent insensibles au premier regard. On classe les matériaux selon leur comportement en présence d'un champ magnétique. Il existe trois grands types de propriétés :

- le **ferromagnétisme** est la propriété que possède les matériaux qui, en présence d'un champ magnétique, sont fortement attirés et possèdent à leur tour la faculté d'aimanter. En présence d'une excitation magnétique, les matériaux ferromagnétiques acquièrent une aimantation qu'ils conservent, une fois que l'excitation cesse, plus ou moins longtemps selon le matériau. Ce sont de tels matériaux qui permettent de stocker les informations dans les disques durs, les pistes magnétiques des cartes et, jadis, dans les cassettes audio.  
On peut citer, parmi les matériaux ferromagnétiques, le nickel, le cobalt, la magnétite ainsi que le fer doux que l'on utilise pour fabriquer les noyaux magnétiques ;
- le **paramagnétisme** est la propriété que possède les matériaux qui, en présence d'une excitation magnétique, ne sont que très faiblement attirés et ne transmettent que très peu cette aimantation. Contrairement aux matériaux ferromagnétiques, les matériaux paramagnétiques ne conservent pas leur faible aimantation une fois l'excitation disparue. On peut citer comme matériaux paramagnétiques l'aluminium, le tungstène et le lithium ;
- le **diamagnétisme** est la propriété que possèdent les matériaux qui s'aimantent de façon à s'opposer à l'excitation qu'ils subissent. Ainsi, les matériaux diamagnétiques sont repoussés par les aimants. Dans la quasi-totalité des cas, l'aimantation d'un matériau diamagnétique est très faible,

de sorte qu'il est difficile de l'observer à l'œil nu<sup>3</sup>. On peut citer comme matériaux diamagnétiques le cuivre, le plomb, l'eau, le bois et le plastique.

• *Perméabilité aux lignes de champ*

La grandeur qui détermine les propriétés magnétiques d'un matériau est la perméabilité magnétique. Cette grandeur traduit la faculté d'un matériau à concentrer les lignes de champ, comme le montre la figure 1.9.



**Figure 1.9** – Allure des lignes de champ (a) aux abords d'un matériau diamagnétique, (b) dans le vide, (c) aux abords d'un matériau paramagnétique et (d) aux abords d'un matériau ferromagnétique. Evolution qualitative de la densité de flux magnétique  $B$ .

- (a) Dans le cas du diamagnétisme, le matériau est un peu imperméable. Il a donc tendance à repousser les lignes de champ, ce qui a pour effet une diminution de la densité de flux et donc du champ magnétique à ses abords.
- (b) Le vide est neutre d'un point de vue magnétique. Il n'a donc aucun effet. Notons que l'air est en réalité paramagnétique, mais il l'est si peu que l'on peut raisonnablement le considérer comme neutre.
- (c) Dans le cas du paramagnétisme, le matériau est un peu perméable. Il a donc tendance à concentrer légèrement les lignes de champ.
- (d) Dans le cas du ferromagnétisme, le matériau est très perméable. Il a une forte faculté à concentrer les lignes de champ de sorte que, à ses abords, le champ magnétique devient conséquent.

• *Circuit magnétique*

En électrotechnique, on ne s'intéressera pas aux matériaux paramagnétiques et diamagnétiques, que l'on qualifiera de *non-magnétiques*. En revanche, on utilisera les

3. Les supraconducteurs ont la propriété rare d'être fortement diamagnétiques. On peut ainsi trouver sur le web de magnifiques expériences de lévitation.

matériaux ferromagnétiques, que l'on qualifiera de *magnétiques*, pour leur capacité à concentrer les lignes de champ (figure 1.9(d)). Les matériaux ferromagnétiques sont de formidables **entonnoirs magnétiques** : ils sont capables de guider les lignes de champ et donc le flux magnétique. On les utilise donc comme guides magnétiques.

Un matériau ferromagnétique joue pour le flux magnétique un rôle comparable à celui que joue un câble conducteur pour le courant électrique.

Par analogie avec les circuits électriques, on définit l'équivalent de la résistance électrique : la **réluctance** représente la faculté d'un matériau magnétique à résister au flux magnétique.

### 1.1.3 Les lois de l'électromagnétisme

Le XIX<sup>e</sup> siècle a été le berceau de l'électrotechnique, puisque c'est à cette époque qu'ont été posées les bases de l'électricité et de l'électromagnétisme. En 1800, le savant italien Alessandro Volta ouvre le siècle en inventant la pile qui porte son nom et qui constitue la première source d'électricité continue. Vingt ans plus tard, le Danois Hans Christian Ørsted fait une découverte qui donnera naissance aux électro-aimants. Très vite, toutes les lois de l'électromagnétisme seraient mises en évidence.

#### a) Le théorème d'Ampère et la loi de Biot et Savart

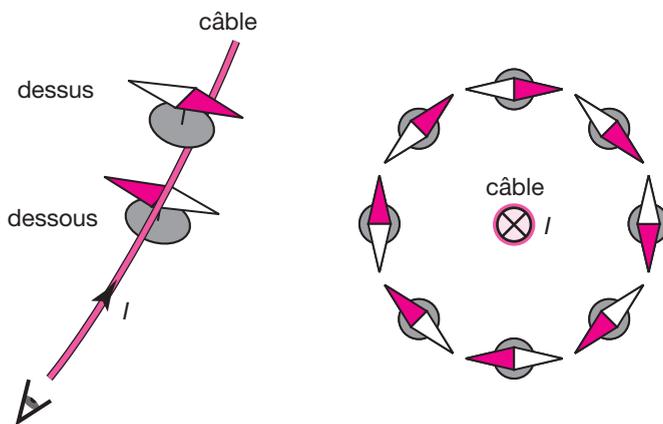
##### • *L'expérience d'Ørsted*

En 1820, équipé d'une boussole et d'une pile Volta alimentant un câblé électrique, Ørsted remarque que le passage du courant fait dévier la boussole. La déviation dépend de la position de la boussole et du sens du courant, comme indiqué sur la figure 1.10. Peu après, Ampère d'un côté et Biot et Savart de l'autre décrivent les lignes de champ générées par le câble. Comme reporté sur la figure 1.11, les lignes de champ décrivent des cercles autour du câble. Le sens de rotation des lignes dépend du sens de circulation du courant. Pour le déterminer, on utilise la règle du tire-bouchon.

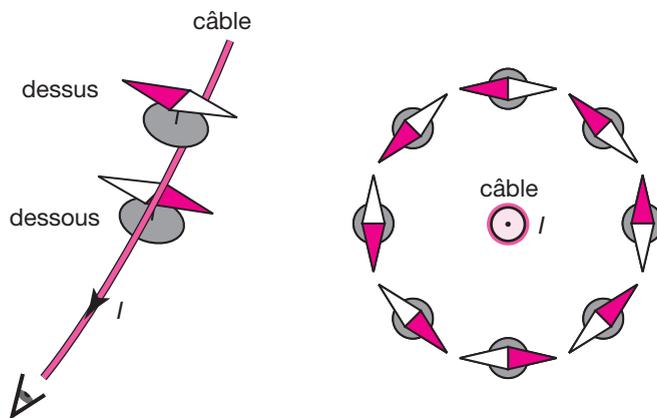
##### • *La règle du tire-bouchon*

La règle du tire-bouchon permet de déterminer le sens de lignes de champ et donc du champ magnétique à partir du déplacement du courant. Elle s'énonce comme suit :

- si le courant se déplace de façon rectiligne, le sens du champ magnétique est le sens dans lequel il faut faire tourner le tire-bouchon pour qu'il progresse dans le sens du courant ;



Situation 1

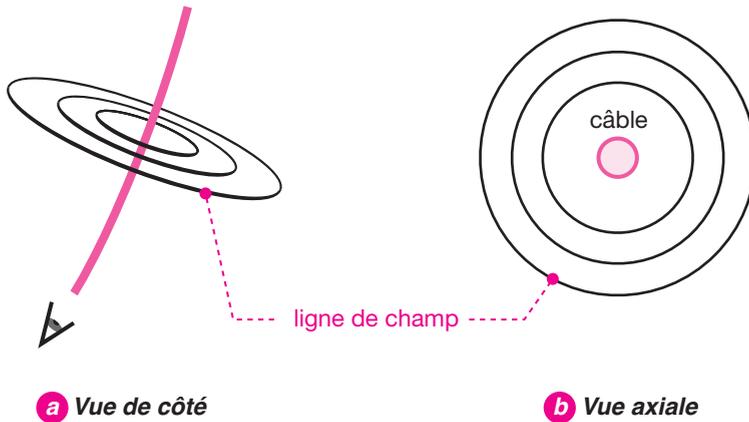


Situation 2

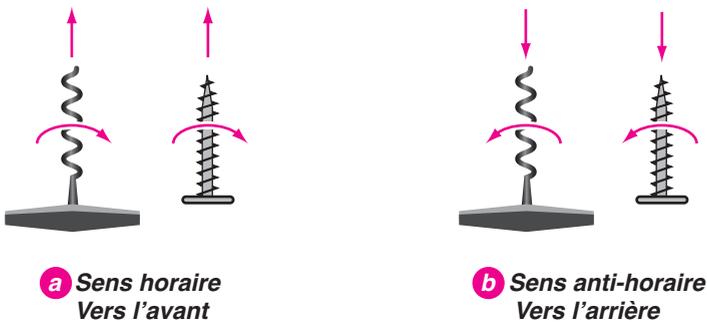
**Figure 1.10** – L'expérience d'Ørsted : le courant dévie la boussole. Dans chaque situation, le schéma de droite constitue une vue dans l'axe du câble autour duquel la boussole est déplacée. Dans la situation 2, le sens du courant est inversé.

- si le courant se déplace de façon circulaire, comme dans une spire par exemple, le sens du champ magnétique est celui dans lequel le tire-bouchon progresse quand on le fait tourner dans le sens du courant.

L'illustration de cette règle est donnée dans la figure 1.12. Le tire-bouchon peut aussi être remplacé par une vis, une perceuse, ou tout autre objet fileté.



**Figure 1.11** – Allure des lignes de champ générées par le câble. Les lignes de champ forment des cercles concentriques au centre desquels passe le câble.



**Figure 1.12** – Détermination du sens du champ magnétique et des lignes de champ à l'aide de la règle du tire-bouchon. Le tire-bouchon avance lorsqu'on le fait tourner dans le sens horaire et le tire-bouchon recule lorsqu'on le fait tourner dans le sens anti-horaire. La règle s'applique aussi au cas d'une vis.

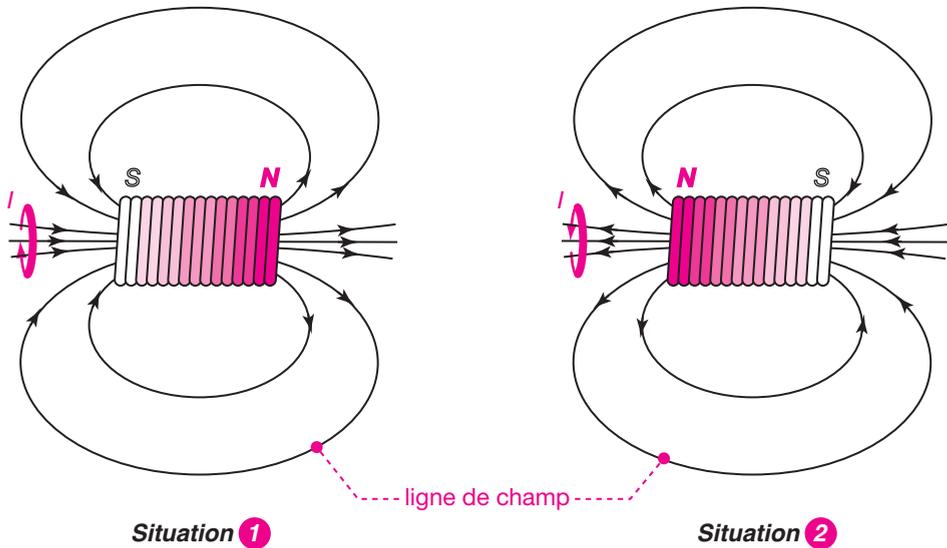
On peut déduire de cette règle que le champ magnétique est de la même nature que le courant qui lui donne naissance. En particulier :

- un courant continu engendre un champ magnétique continu ;
- un courant alternatif engendre un champ magnétique alternatif.

• **La bobine**

Si l'on bobine le fil, alors le courant se déplace circulairement et donne naissance, au moins dans l'axe de la bobine, à un champ magnétique rectiligne. Ainsi, une

bobine permet de créer des lignes de champ comparables à celles que crée un aimant permanent comme le montre la figure 1.13.



**Figure 1.13** – Lignes de champ générées par une bobine vue latéralement. Situation 1 : le pôle nord est sur la face droite de la bobine. Situation 2 : le sens du courant est inversé et le pôle nord se situe sur la face gauche de la bobine.

On peut déterminer, grâce à la règle du tire-bouchon, par quelle face de la bobine sort le champ magnétique et par quelle face il entre, repérant ainsi les pôles nord et sud.

La bobine est un électro-aimant. En plus d'être moins chère, elle présente par rapport à un aimant permanent les avantages suivants :

- l'intensité du champ magnétique qu'elle crée dépend de l'intensité du courant qui la traverse. Elle peut donc être réglée et atteindre des valeurs bien supérieures à celles d'un aimant ;
- la position des pôles dépend du sens du courant : on peut inverser le flux magnétique en changeant le sens du courant.

On utilise des bobinages pour créer les champs magnétiques continus ou variables dans les machines de l'électrotechnique.

## b) La loi de Laplace

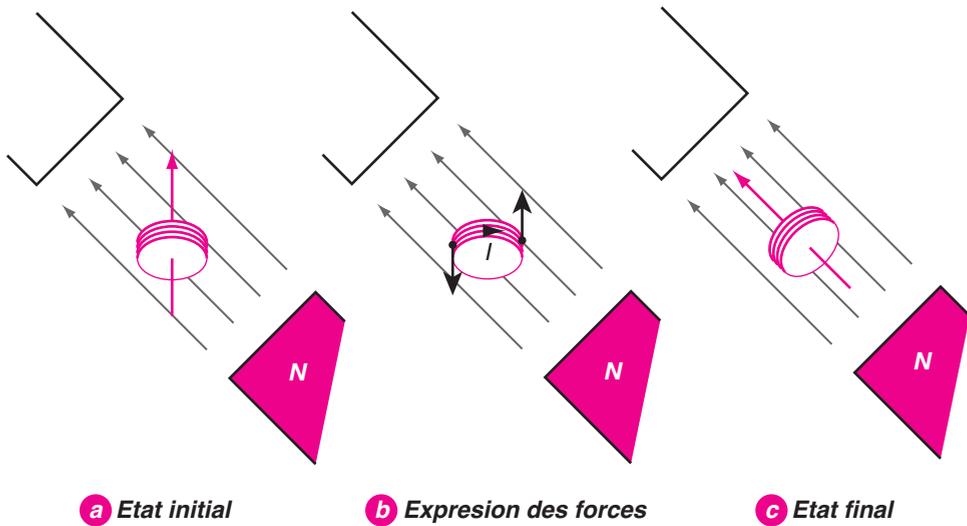
Deux choses ont été mises en évidence dans les paragraphes précédents :

- si l'on plonge dans un champ magnétique un objet qui est lui-même une source de champ magnétique, comme par exemple un aimant, il subit

des forces qui contraignent les deux champs à s'aligner (voir figure 1.5, page 7) ;

- un circuit électrique parcouru par un courant est une source de champ magnétique.

On en déduit alors, comme le montre la figure 1.14, que tout circuit électrique parcouru par un courant et plongé dans un champ magnétique subit des forces qui le poussent à s'aligner correctement. Cette propriété est connue sous le nom de *loi de Laplace*.



**Figure 1.14** – Un bobinage parcouru par un courant est une source de champ magnétique. Les forces magnétiques contraignent le bobinage à aligner son champ avec celui de l'aimant permanent.

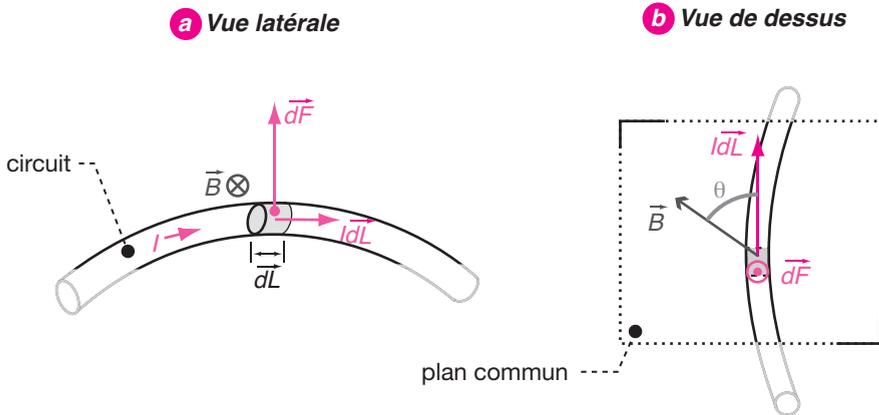
La loi de Laplace décrit la force magnétique appliquée sur un petit morceau de circuit électrique en fonction de l'intensité du courant, de son déplacement et des caractéristiques du champ magnétique. Aussi, les forces magnétiques sont aussi appelées *forces de Laplace*.

- *Avec le produit vectoriel*

Considérons une petite portion  $dL$  de circuit électrique parcourue par un courant  $I$  et plongée dans un champ magnétique  $\vec{B}$ , comme indiqué sur la figure 1.15. Définissons pour nos calculs le vecteur  $\vec{dL}$ , qui a mêmes sens et direction que le courant  $I$  et pour norme la longueur  $dL$ . Sous l'effet conjoint du champ et du courant, cet élément de

circuit subit une force  $\vec{dF}$  vérifiant la relation vectorielle :

$$\vec{dF} = I \cdot \vec{dL} \wedge \vec{B} \quad (1.4)$$



**Figure 1.15** – Élément de circuit électrique de longueur  $dL$  (en gris) plongé dans un champ magnétique  $\vec{B}$  et traversé par un courant  $I$ . L'élément est donc soumis à la force de Laplace  $\vec{dF}$ . (a) Vue latérale et (b) vue de dessus. Le plan commun est le plan contenant le champ magnétique  $\vec{B}$  et le sens de déplacement du courant  $I\vec{dL}$ .

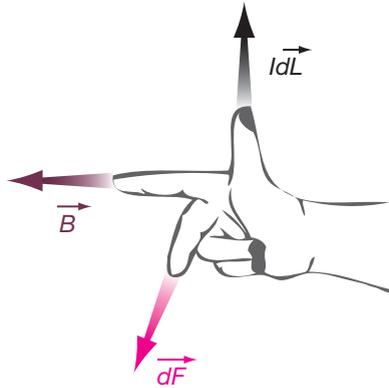
• Avec la main droite

La force magnétique  $\vec{dF}$  n'est appliquée à la portion de circuit que si le sens de déplacement du courant  $I\vec{dL}$  et le champ magnétique forment un plan. On déduit les caractéristiques de la force de Laplace de la façon suivante :

- $\vec{dF}$  est dirigée perpendiculairement au plan formé par le déplacement du courant et le champ magnétique ;
- pour obtenir le sens de  $\vec{dF}$ , on fait un trièdre pouce-index-majeur avec la main droite : le pouce prend la direction et le sens de  $I\vec{dL}$ , l'index celles de  $\vec{B}$ , le majeur étant alors dirigé dans le sens et la direction de  $\vec{dF}$ , comme indiqué sur la figure 1.16.
- L'intensité de  $\vec{dF}$  en newton (N) se calcule avec la formule

$$dF = I \cdot dL \cdot B \cdot \sin \theta \quad (1.5)$$

où  $\theta$  est l'angle entre le champ magnétique et la direction du courant.



**Figure 1.16** – Règle de la main droite permettant de déterminer la force magnétique élémentaire  $\vec{dF}$  (force de Laplace) appliquée à l'élément de circuit orienté  $\vec{dL}$  traversé par le courant  $I$ .

S'il en a la liberté, un conducteur soumis aux forces de Laplace entre en mouvement. Dans les machines électriques, on contrôle le mouvement des conducteurs en les fixant de manière adéquate : par exemple, une spire fixée sur un axe mobile peut épouser un mouvement de rotation.

On peut déplacer un circuit électrique plongé dans un champ magnétique et contrôler son mouvement en jouant sur l'intensité du courant qui le traverse et les caractéristiques du champ.

- *Mesure de courant avec un galvanomètre à cadre mobile*

Il est possible d'exploiter les forces de Laplace afin de concevoir un appareil de mesure du courant : le *galvanomètre à cadre mobile*. Cet instrument analogique, aussi appelé *galvanomètre magnéto-électrique*, permet de mesurer des courants de l'ordre du micro-ampère. Pour cela, il met en concurrence les forces magnétiques, proportionnelles au courant, et la force de rappel de ressorts spiraux. Le principe de fonctionnement est illustré dans la figure 1.17. L'aiguille permet de lire la valeur du courant mesuré en dessous d'une valeur maximale, égale à  $20 \mu\text{A}$  dans notre exemple, appelée *calibre* (volet (a)). En l'absence de courant, l'aiguille est en butée et affiche zéro : cette position est reportée en pointillés sur les quatre volets. Elle peut être réglée en agissant sur une vis qui n'est pas représentée dans la figure. L'axe de rotation de l'aiguille est le support d'un cadre mobile qui est plongé dans un champ magnétique et traversé par le courant à mesurer (volet (b)). La circulation d'un courant en présence d'un flux magnétique permet aux forces de Laplace de s'exprimer sur le