

Électrotechnique

Christophe Palermo

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

2^e édition

DUNOD

Cet ouvrage est également publié sous le titre *Précis d'électrotechnique*
dans la collection « Sciences Sup »

© Dunod, 2018, 2020 pour la nouvelle présentation.

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-082125-9

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° 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

1	Principes, grandeurs et mesure	1
1.1	Notions d'électromagnétisme	1
1.2	Notions d'électricité	25
1.3	Énergie et puissance	65
1.4	Machines électriques tournantes	78
2	La machine à courant continu	95
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
3	Le transformateur monophasé	151
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
4	Systèmes triphasés équilibrés	185
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
5	L'alternateur synchrone	235
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
6	Le moteur asynchrone	273
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
7	Éléments de sécurité électrique	301
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 cm² 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.

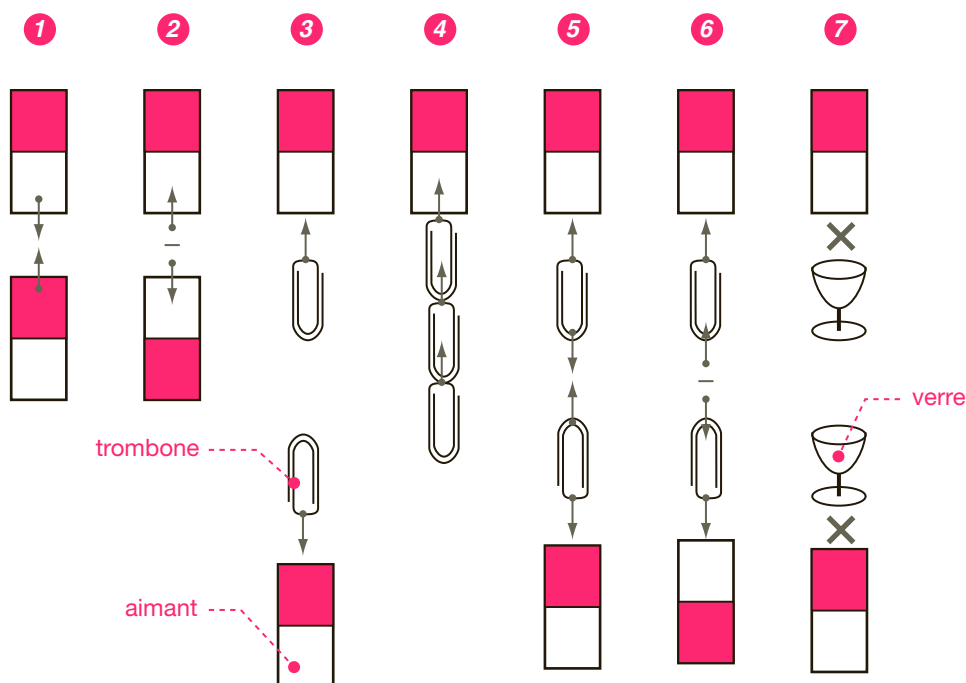


Figure 1.1 – Quelques observations possibles avec des aimants, des trombones et des verres.

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 sud¹. 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 point 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.

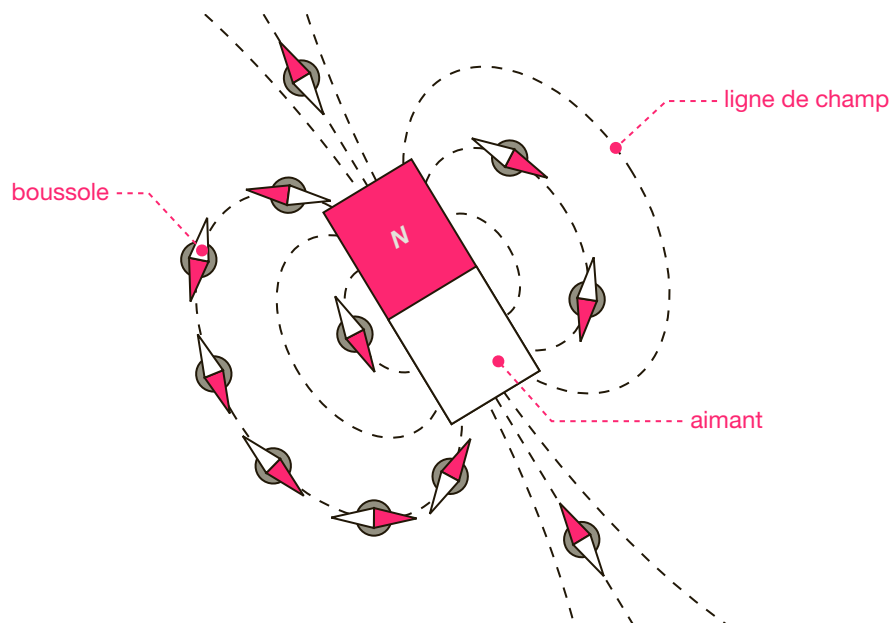


Figure 1.2 — Lignes de champ générées par un aimant maintenu fixe. Les boussoles, plongées dans le champ magnétique, réagissent en conséquence et s'alignent.

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.

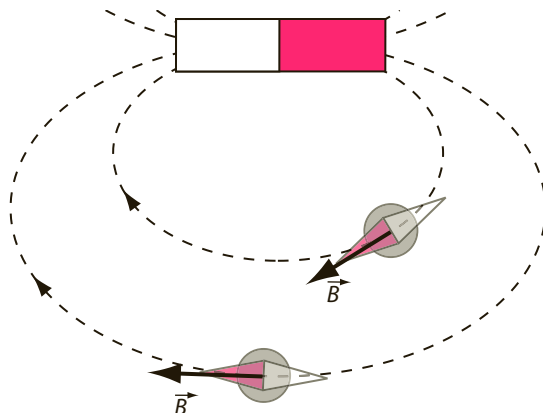


Figure 1.3 – Champ magnétique et ligne de champ.

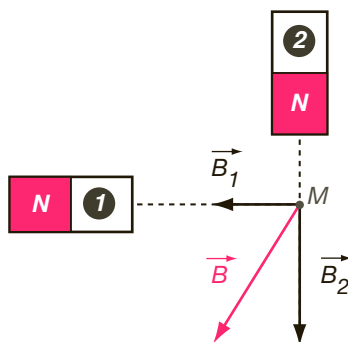


Figure 1.4 – Champ magnétique créé au point M par deux aimants permanents. Le champ $\vec{B}$ est la somme vectorielle des champs $\vec{B}_1$ et $\vec{B}_2$ créés par les aimants 1 et 2, respectivement.

• 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.

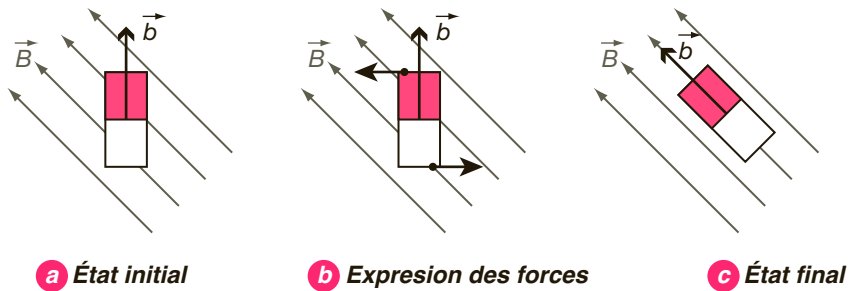


Figure 1.5 — Expression de la force magnétique sur un aimant plongé dans un champ magnétique $\vec{B}$. (a) On associe à l'aimant le champ magnétique $\vec{b}$. (b) Un couple de forces magnétiques agit sur l'aimant (c) afin d'aligner les champs $\vec{B}$ et $\vec{b}$.

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 ϕ 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 $\vec{B}_1$.

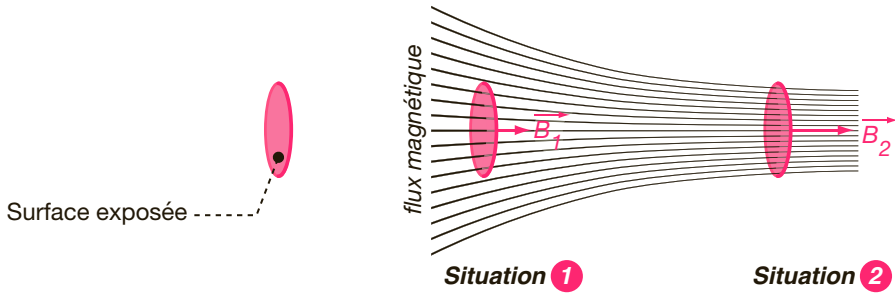


Figure 1.6 – Flux magnétique, densité de flux et champ magnétique. La surface exposée est la même dans les deux situations.

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 ² dS dans la situation reportée sur la figure 1.7.

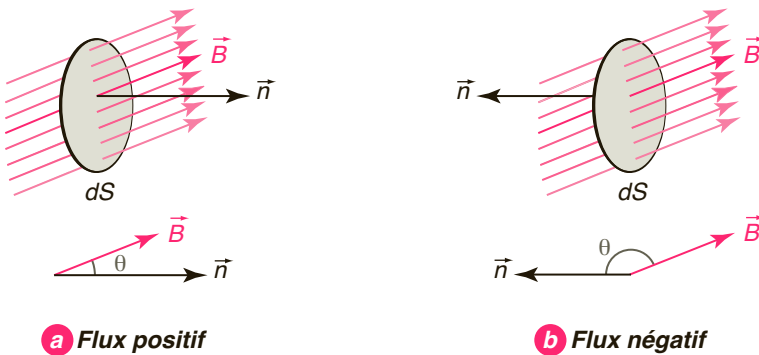


Figure 1.7 – Surface élémentaire dS de normale $\vec{n}$ soumise à un champ magnétique $\vec{B}$. Le signe du flux dépend du sens de $\vec{n}$.

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 θ 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 ϕ 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).

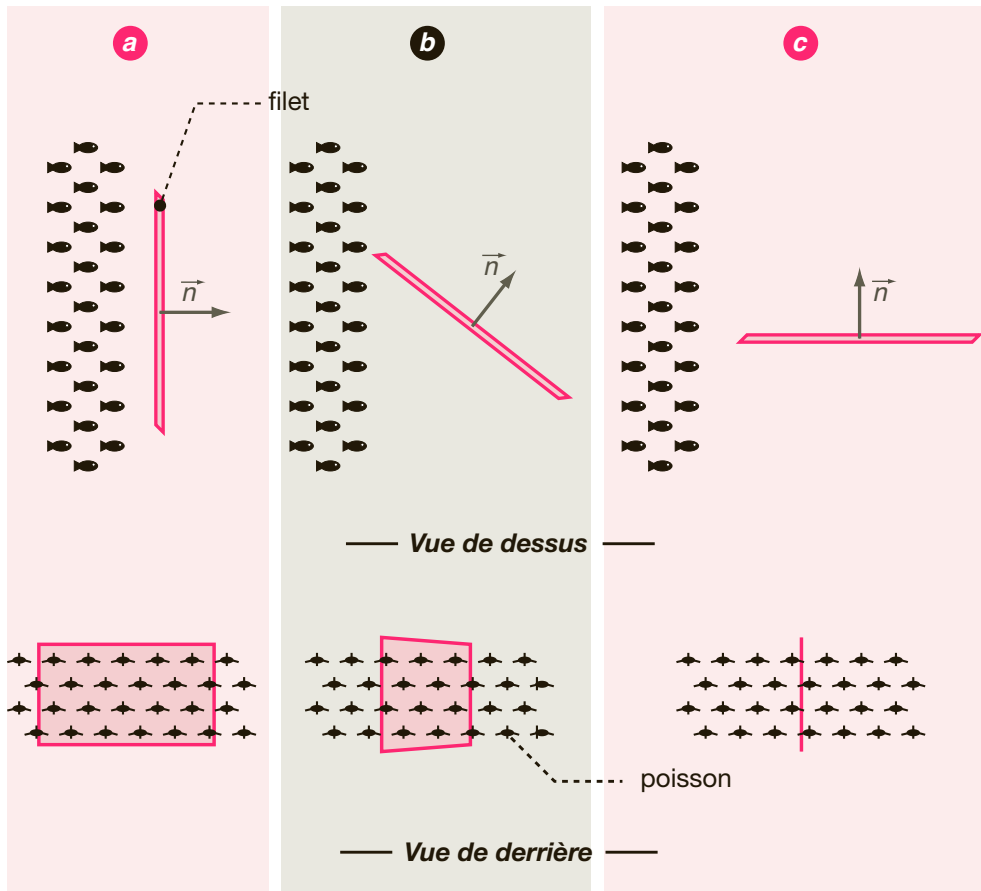


Figure 1.8 — Analogie du flux magnétique à travers une surface avec un flux de poissons à travers un cadre. Le plan du cadre est (a) perpendiculaire au déplacement des poissons, (b) placé dans une configuration quelconque, puis (c) parallèle au déplacement des poissons.

- 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 nu³. 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.

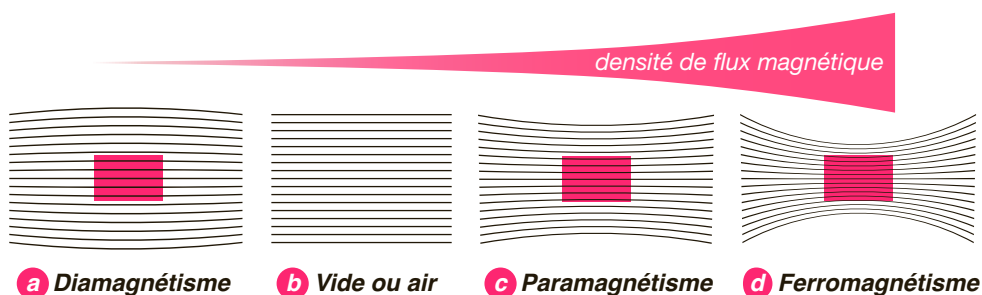


Figure 1.9 – Allure des lignes de champ (a) aux abords d'un matériau diamagnétique, (b) dans le vide, (c) aux abords d'un matériau paramagnétique et (d) aux abords d'un matériau ferromagnétique. Evolution qualitative de la densité de flux magnétique B .

- (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.