




Le Cours de Physique de Karlsruhe  
pour le niveau lycée

## **Electromagnétisme**

# Le Cours de Physique de Karlsruhe

Un manuel pour le niveau lycée

 Electromagnétisme

 Thermodynamique

 Oscillations, ondes, données

 Mécanique

 Physique atomique, physique nucléaire, physique des particules

Friedrich Herrmann

Professeur à l'Institut de Technologie de Karlsruhe

Édition 2022

Auteur : Friedrich Herrmann, Co-auteur : Holger Hauptmann

Traduction de l'allemand à l'anglais : Kathrin Schilling

Traduction de l'anglais au français : Antoine Archer, Jean-François Combes, Pierre Thomas, 2022

Figures : F. Herrmann, H. Schwarze

Mise en page : H. Schwarze



Sous licence Creative Commons

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

# CONTENU

## 1 Le champ électrique

---

1.1 Révision : le circuit électrique	5	1.15 Règles pour dessiner les champs électriques	23
1.2 Le potentiel électrique	6	1.16 Quatre champs électriques importants	25
1.3 Le point zéro du potentiel électrique	7	1.17 Calcul de l'intensité des champs électriques	27
1.4 Problèmes électrotechniques	9	1.18 Plusieurs corps chargés – addition de vecteurs	28
1.5 Courbes caractéristiques – la résistance électrique	11	1.19 Compression et traction dans le champ électrique	30
1.6 La résistance du voltmètre et de l'ampèremètre	13	1.20 Condensateur et capacité	34
1.7 La conductivité électrique	13	1.21 Surfaces à potentiel constant	36
1.8 Potentiel électrique et énergie	14	1.22 En savoir plus sur le condensateur	38
1.9 Charge et porteurs de charge	15	1.23 L'énergie du champ électrique	39
1.10 Courant de charge et courant de porteur de charge	16	1.24 Courbe de décharge du condensateur	41
1.11 Accumulation de la charge électrique	16	1.25 Champs et conducteurs électriques	44
1.12 Le champ électrique	18	1.26 La densité de courant électrique – loi d'Ohm locale	46
1.13 L'intensité du champ électrique	21	1.27 Comment charger en énergie des particules chargées électriquement – les faisceaux d'électrons	47
1.14 Représentation graphique des champs électriques	22		

## 2 Le champ magnétique

2.1 Charge magnétique et champ magnétique	49	2.9 Mesurer la charge magnétique	61
2.2 Magnétisation	50	2.10 Contraintes de compression et de traction au sein du champ magnétique	62
2.3 L'intensité du champ magnétique	52	2.11 Electroaimants	65
2.4 Lignes de magnétisation et lignes de champ	53	2.12 Intensité du champ magnétique, magnétisation et densité de flux magnétique	66
2.5 Quatre champs magnétiques importants	54	2.13 La bobine – l'inductance	67
2.6 Matériaux magnétiques doux	55	2.14 L'énergie du champ magnétique	68
2.7 Courant électrique et champ magnétique	57	2.15 « Décharge » de la bobine	68
2.8 Calcul de l'intensité du champ magnétique	59	2.16 Comment le champ magnétique agit mécaniquement sur un courant électrique	70

## 3 L'interaction entre champs électrique et magnétique

3.1 Analogie en électromagnétisme	77	3.7 Supraconducteurs	88
3.2 Induction électromagnétique	78	3.8 Champs électriques induits – l'interaction entre champs électrique et magnétique	90
3.3 Le générateur	82	3.9 Ondes électromagnétiques	92
3.4 Tension alternative et courant alternatif	84	3.10 Ondes carrées	92
3.5 Le transformateur	85	3.11 Transmission d'énergie avec les ondes électromagnétiques	
3.6 Un générateur quelque peu particulier – « courants magnétiques »		3.12 Ondes sinusoïdales	95

## Constantes physiques et formules

97





# 1 LE CHAMP ÉLECTRIQUE

## 1.1 Révision : le circuit électrique

Nous commençons par quelques révisions. Dans cette partie, vous ne rencontrerez que quelques nouveaux sujets, que vous n'avez pas encore vus au cours des leçons précédentes.

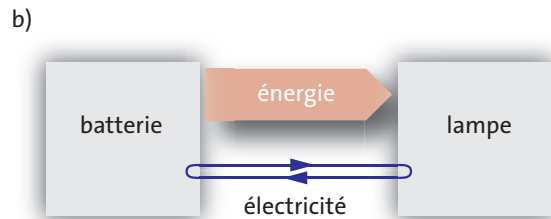
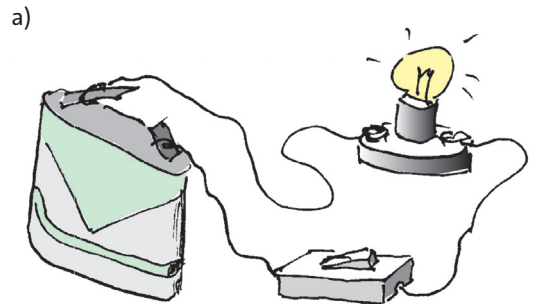
La Fig. 1.1a montre une ampoule électrique reliée à une pile par l'intermédiaire d'un interrupteur. L'énergie est transportée par l'électricité comme porteur, de la pile vers l'ampoule. Au niveau de la lampe, elle est transférée au porteur d'énergie lumière. L'énergie vient de la pile, elle atteint la lampe et elle quitte la lampe avec la lumière. Au cours de ce processus, la pile se vide lentement, c'est-à-dire que son contenu en énergie diminue.

Le porteur d'énergie, c'est-à-dire l'électricité, prend un chemin différent : il circule en boucle fermée. L'électricité sort de la pile par l'un des deux contacts, le contact plus, puis circule dans un fil jusqu'à la lampe, puis par le filament de la lampe et le deuxième fil, et enfin par l'interrupteur jusqu'au contact moins de la pile et revient au contact plus à travers la pile. Comme l'électricité se déplace sur un chemin fermé sans s'accumuler nulle part, l'ensemble du système est appelé *circuit électrique*. Le courant de l'électricité a également un synonyme plus court : le courant électrique.

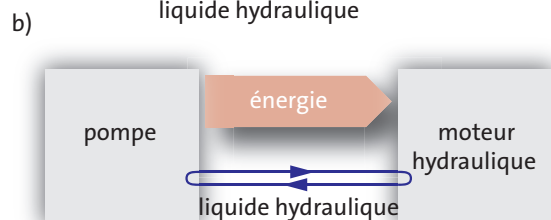
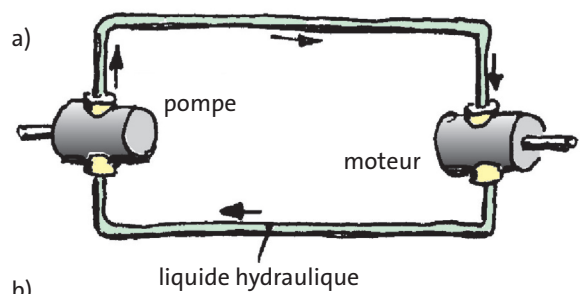
Un circuit électrique est assez similaire à un circuit hydraulique qui fait partie, par exemple, d'une excavatrice, Fig. 1.2a. Ici, le porteur d'énergie, c'est-à-dire le liquide hydraulique, circule également dans une boucle fermée. Les diagrammes de flux, Fig. 1.1b et Fig. 1.2b, illustrent cette similitude.

Tout comme la pompe fait circuler le liquide dans le circuit hydraulique, la pile dans notre circuit électrique fait circuler l'électricité. Nous pouvons donc considérer la pile comme une pompe à électricité.

Il existe également d'autres sources qui libèrent de l'énergie en utilisant l'électricité comme porteur, c'est-à-dire d'autres pompes à électricité. L'une d'entre elles est la dynamo de vélo. Les très grandes dynamos, comme celles des centrales électriques, sont appelées

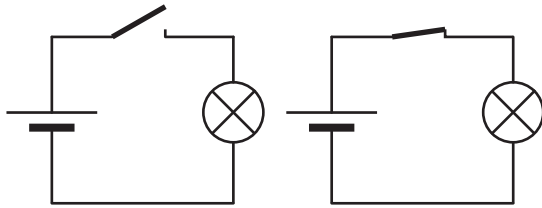


**Fig. 1.1** Circuit électrique avec son diagramme de courant d'énergie

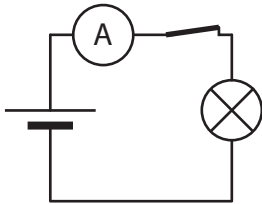


**Fig. 1.2** Circuit électrique avec son diagramme de courant d'énergie

## Le potentiel électrique



**Fig. 1.3** Illustration symbolique du circuit électrique de la Fig. 1.1 avec un interrupteur ouvert et un interrupteur fermé.



**Fig. 1.4** Mesure du courant électrique : le circuit électrique est interrompu et les deux extrémités du fil nouvellement formées sont reliées à l'ampèremètre.

alternateurs. Les cellules photovoltaïques et les thermocouples sont d'autres types de pompes à électricité. Alors qu'un alternateur tire son énergie du porteur moment cinétique, une cellule photovoltaïque reçoit son énergie de la lumière et un thermocouple de l'entropie.

La pile, l'alternateur, la cellule photovoltaïque et le thermocouple sont des pompes à électricité.

Lorsque l'on traite des circuits électriques, une illustration symbolique des différents composants est utile. La Fig. 1.3 montre une représentation symbolique du circuit électrique de la Fig. 1.1.

L'électricité ou, comme on dit aussi, la *charge électrique* est une grandeur physique. Son symbole est  $Q$ , son unité de mesure est le coulomb, abrégé par le symbole  $C$ .

L'intensité du courant électrique  $I$ , ou en abrégé courant électrique, est définie en tout point d'un circuit électrique comme la quantité d'électricité (quantité de charge)  $\Delta Q$ , qui circule en ce point à travers une section transversale du conducteur dans un intervalle de temps donné  $\Delta t$ , divisée par cet intervalle de temps :

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

L'unité de mesure du courant électrique est l'ampère (A). Nous pouvons écrire :

$$A = \frac{C}{s}$$

Le courant électrique est mesuré à l'aide d'un ampèremètre. Un ampèremètre est intégré dans un circuit électrique de telle sorte que le courant doit passer par l'instrument de mesure, Fig. 1.4.

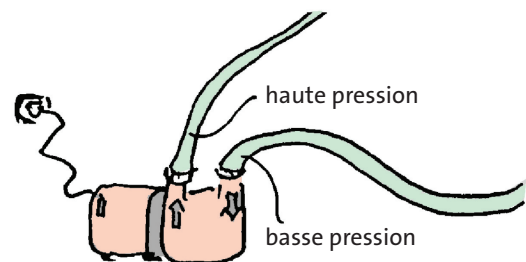
D'abord, le circuit électrique de la Fig. 1.3 n'est pas fermé. Nous fermons maintenant l'interrupteur. Une charge électrique circule dans la lampe. Mais d'où vient cette charge ? Nous pourrions penser qu'elle provient de la pile, tout comme l'énergie. En réalité, c'est différent. Tout comme une pompe à eau ne peut refouler en sortie que la quantité d'eau qu'elle admet à son entrée, une pompe à électricité ne peut libérer à sa sortie, c'est-à-dire au contact plus, que la quantité d'électricité qu'elle absorbe au contact moins. D'où vient donc l'électricité ?

Elle est contenue depuis le départ dans les composants du circuit électrique : dans la pile, dans la lampe et dans les fils. Cette électricité n'est cependant pas introduite dans ces appareils par le fabricant, mais elle y est naturellement contenue. Chaque morceau de fil, et chaque pièce de métal, contient de l'électricité. L'électricité commence à circuler lorsque le fil ou le morceau de métal est intégré dans un circuit électrique.

## 1.2 Le potentiel électrique

La fonction d'une pompe est d'élever la pression de l'eau entre son entrée et sa sortie, Fig. 1.5. La pompe à eau crée une différence de pression. Cette différence de pression peut provoquer un courant d'eau.

De même, une pile, c'est-à-dire une pompe à électricité, crée une force motrice : une force motrice pour un courant électrique. Et ici aussi, il y a une grandeur physique qui a une valeur plus élevée sur une borne, c'est-à-dire sur la borne plus, que sur l'autre, la borne moins, Fig. 1.6. Cette grandeur physique est appelée



**Fig. 1.5** La pression à la sortie de la pompe à eau est supérieure à celle de l'entrée.

potentiel électrique. Le potentiel électrique dans un circuit électrique correspond à la pression dans un circuit hydraulique.

Une pile crée une *différence* de potentiel, et cette différence de potentiel fonctionne comme une force motrice pour un courant électrique. Une différence de potentiel est également appelée tension.

Une pompe à électricité (pile, batterie, générateur) crée une différence de potentiel (= tension). Cette différence de potentiel est une force motrice pour le courant électrique.

La borne présentant le potentiel le plus élevé est marquée d'un signe plus, celle présentant le potentiel le plus faible d'un signe moins.

L'unité de mesure du potentiel, et par conséquent aussi de la tension, est le volt. Ainsi, une mono-cellule crée une différence de potentiel de 1,5 V, une plus grande pile une différence de potentiel de 4,5 V et une batterie de voiture de 12 V.

La lettre grecque  $\varphi$  (qui se prononce : phi) est utilisée comme symbole du potentiel ;  $U$  est le symbole de la tension. On obtient donc pour notre pile

$$\varphi_+ - \varphi_- = 4,5 \text{ V ou } U = 4,5 \text{ V.}$$

Les tensions sont mesurées à l'aide d'un voltmètre. Pour cela, les deux bornes du voltmètre sont reliées à deux points ayant un potentiel différent, Fig. 1.7. Les points qui sont reliés entre eux par un câble sont au même potentiel.

### 1.3 Le point zéro du potentiel électrique

Une pile pleine est posée sur la table devant vous. La différence de potentiel entre ses bornes est de 4,5 V, le potentiel à la borne plus dépasse donc de 4,5 V le potentiel à la borne moins. Mais quel est le potentiel au niveau de la borne moins ? Et quel est le potentiel au niveau de la borne plus ?

Il n'est pas facile de répondre à ces questions. Cependant, le problème sera plus facile à résoudre si nous clarifions d'abord une autre question. La Fig. 1.9 montre une règle placée verticalement sur une table ; nous demandons : quelle est l'altitude de l'extrémité supérieure de la règle ?

Pour l'instant, nous pouvons seulement dire que l'extrémité supérieure est située 1 m au-dessus de l'ex-

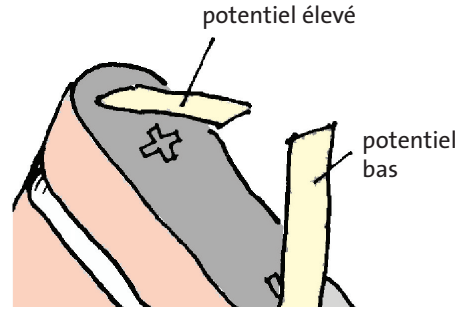


Fig. 1.6 Le potentiel électrique à la borne plus de la batterie (sortie) est plus élevé qu'à la borne moins (entrée).

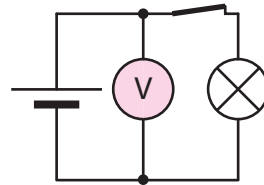


Fig. 1.7 Mesure de la tension : les bornes du voltmètre sont reliées à deux points de potentiel différent.

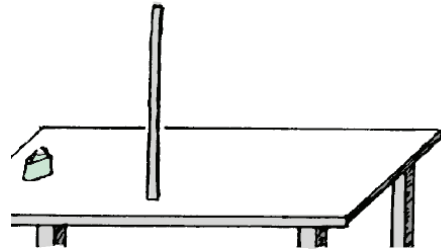


Fig. 1.8 Quel est le potentiel de la borne plus de la pile ? Quelle est l'altitude de l'extrémité supérieure de la règle ?

trémité inférieure. Mais quelle est l'altitude de l'extrémité inférieure ? La réponse à cette question dépend de notre point de référence : le sol de la pièce, le niveau du sol à l'extérieur de la maison ou tout autre niveau. Comme vous le savez certainement, l'altitude d'un terrain est généralement indiquée par référence au niveau de la mer. L'altitude de la surface de l'océan est arbitrairement fixée à 0 m. Maintenant, nous pourrions théoriquement indiquer l'altitude de l'extrémité supérieure de notre règle par rapport au niveau de la mer. La distance par rapport au niveau de la mer n'est cependant pas facile à déterminer.

Le potentiel se comporte d'une manière très similaire à l'altitude. D'abord, nous devrions choisir un conducteur électrique auquel nous attribuerions la valeur de potentiel 0 V. À partir de là, il serait possible

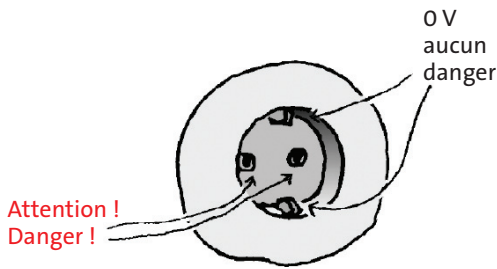


Fig. 1.9 Le contact de protection de la prise est au potentiel de la terre.

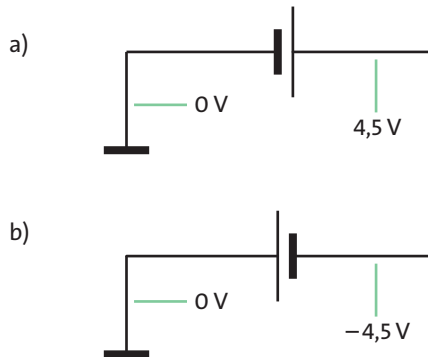


Fig. 1.10 (a) Contact moins de la pile mis à la terre ; contact plus à +4,5 V. (b) Contact plus mis à la terre ; contact moins à -4,5 V.

d'indiquer les valeurs de potentiel de tous les autres fils, bornes électriques, etc. Le conducteur dont le potentiel est utilisé comme potentiel de référence doit bien sûr être accessible à tous. Un conducteur qui remplit ces conditions est la Terre. C'est pourquoi on a établi ce qui suit :

Le potentiel de la Terre est 0 V.

Si un point quelconque d'un circuit électrique est relié à la Terre par un fil, ce point sera à 0 V. Nous disons que ce point a été *mis à la terre*.

Pour mettre quelque chose à la terre, il n'est même pas nécessaire de tirer une ligne jusqu'à la Terre. Le contact de protection de la prise est relié au conducteur dit neutre du réseau électrique, et ce conducteur neutre est mis à la terre. Le contact de protection de la prise est donc également à 0 V, Fig. 1.9.

Revenons à la pile sur la table devant vous. D'après ce qui a été dit jusqu'à présent, nous ne connaissons pas les valeurs individuelles de potentiel des contacts plus et moins, tout comme nous ne connaissons pas les altitudes des extrémités de la règle. Pour la pile cependant, nous pouvons facilement rendre les choses

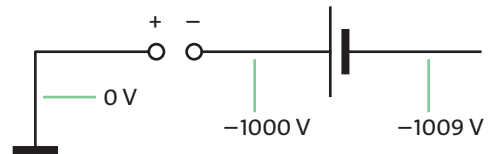


Fig. 1.11 Le contact plus de la pile a un potentiel de -1000 V.

plus claires : nous mettons simplement à la terre l'une des deux bornes. La Fig. 1.10a montre une pile dont le contact moins est mis à la terre, nous pouvons donc dire que :

$$\varphi_- = 0 \text{ V.}$$

Pour le contact plus, on obtient donc :

$$\varphi_+ = 4,5 \text{ V.}$$

Sur la Fig. 1.10b, le contact plus est mis à la terre. Nous avons donc

$$\varphi_+ = 0 \text{ V et } \varphi_- = -4,5 \text{ V.}$$

Par conséquent, le potentiel du contact moins est maintenant négatif. Bien sûr dans les deux cas, c'est-à-dire sur les Fig. 1.10a et Fig. 1.10b, la règle suivante s'applique :

$$\varphi_+ - \varphi_- = 4,5 \text{ V.}$$

Les termes « contact plus » et « contact moins » (ou « borne plus » et « borne moins ») sont généralement utilisés bien qu'ils prêtent à confusion. Ils suggèrent que le contact plus se trouve à un potentiel positif et le contact moins à un potentiel négatif. La Fig. 1.10 montre que cela ne doit pas nécessairement être le cas. Sur la Fig. 1.10a, le contact moins a le potentiel 0 V ; son potentiel n'est donc pas négatif, et dans la Fig. 1.10b, celui du contact plus n'est pas positif.

La Fig. 1.11 le montre encore plus clairement.

Ici, une pile de 9 V et une alimentation de 1000 V sont connectées l'une à l'autre. Le contact plus de l'alimentation est mis à la terre et son potentiel est donc de 0 V. Son contact moins est de 1000 V inférieur, c'est-à-dire qu'il est égal à -1000 V. Comme le contact plus de la pile est relié au contact moins de l'alimentation, le contact plus de la pile a également un potentiel de -1000 V. Le potentiel du contact plus de la pile est donc négatif.

La Fig. 1.12 montre un circuit électrique qui est mis à la terre en un point.

**Exercices**

1. Chacune des piles de la Fig. 1.13a crée une tension de 4,5 V. A quels potentiels se trouvent les points 1, 2 et 3 ?
2. Chacune des piles de la Fig. 1.13b crée une différence de potentiel de 12 V. A quels potentiels se trouvent les points 1, 2 et 3 ?
3. Chacune des deux piles de la Fig. 1.14a crée une différence de potentiel de 9 V. Quelles tensions sont indiquées par les trois voltmètres ?
4. Dessinez un voltmètre sur la Fig. 1.14b qui mesure la tension entre les connexions de la lampe. Dessinez un voltmètre qui mesure la tension de la batterie.
5. Donnez des exemples de circuits électriques qui ne peuvent pas être mis à la terre.

**1.4 Problèmes électrotechniques**

Nous allons parler d'une méthode qui facilite la résolution des problèmes électrotechniques.

Chaque fois qu'un « schéma de circuit » est donné, les conducteurs sont mis en évidence par des couleurs distinctes de manière à ce que tous les conducteurs au même potentiel soient marqués de la même couleur. Il est clair qu'un conducteur ininterrompu sera marqué d'une seule couleur. En général, la couleur change lors du passage dans un dispositif électrique (lampe, moteur électrique, pile, générateur, etc.).

Les Fig. 1.15 à Fig. 1.17 en donnent des exemples.

La Fig. 1.15 montre la pile de la Fig. 1.10 avec ses fils de connexion dessinés selon la nouvelle méthode.

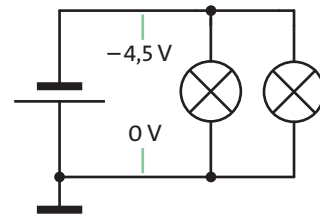
La Fig. 1.16 montre à nouveau les lampes de la Fig. 1.12, et la Fig. 1.17 montre un circuit électrique avec quatre différentes valeurs de potentiel.

Nous aimerions appliquer la coloration des fils à deux problèmes :

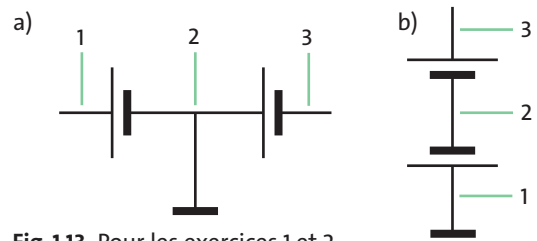
1. Les lampes L1 et L2 de la Fig. 1.16 sont identiques. Au point P, il y a un courant de 3 A. Quel est le courant électrique dans L1 et dans L2 ?

Comme la règle de jonction s'applique pour les points de dérivation, on obtient :  $I_{L1} + I_{L2} = 3 \text{ A}$ . ( $I_{L1}$  et  $I_{L2}$  sont les courants dans les lampes.) Nous pouvons voir, grâce au marquage de couleur, que les deux lampes ont la même tension (c'est-à-dire la même que la pile). Le courant électrique a donc la même force motrice dans les deux lampes. Comme les lampes sont identiques, les courants doivent également être les mêmes, dans les deux lampes, c'est-à-dire :  $I_{L1} = I_{L2} = 1,5 \text{ A}$ .

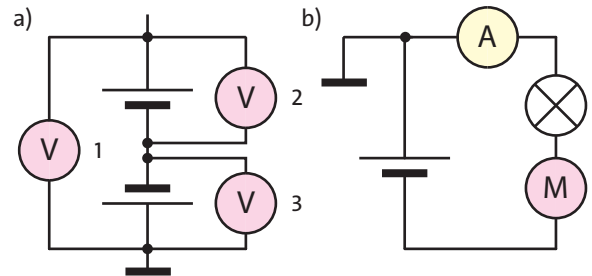
2. Le tronçon B du conducteur de la Fig. 1.17 est à un potentiel de 6 V. Les lampes L1, L2 et L3 sont identiques. Quelle tension est créée par la pile ?



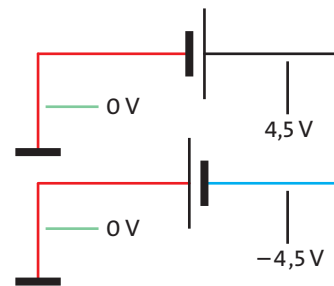
**Fig. 1.12** Circuit électrique qui est mis à la terre en un point.



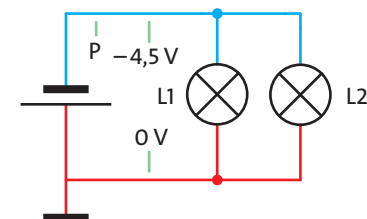
**Fig. 1.13** Pour les exercices 1 et 2



**Fig. 1.14** Pour les exercices 3 et 4



**Fig. 1.15** Les différentes couleurs des conducteurs correspondent à des potentiels différents.



**Fig. 1.16** Comme sur la Fig. 1.12. Les potentiels sont marqués par des couleurs différentes.

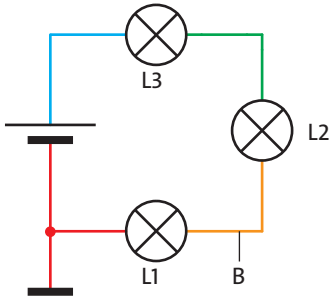


Fig. 1.17 Il y a quatre potentiels différents dans ce circuit.

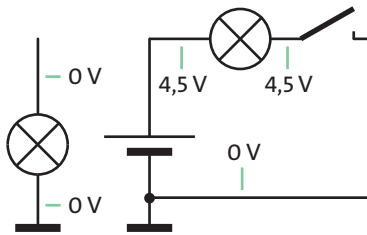


Fig. 1.18 Comme aucun courant électrique ne circule dans la lampe, ses bornes doivent être au même potentiel.

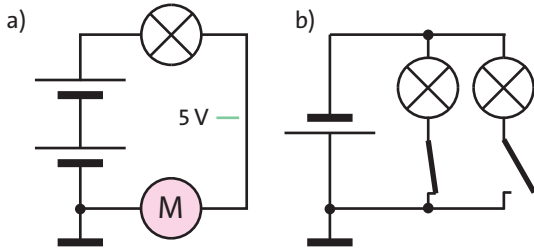


Fig. 1.19 Pour les exercices 1 et 2

Comme le circuit électrique n'est pas ramifié, le courant est le même partout. La tension à la lampe 1 est de 6 V. Elle est la force motrice du courant qui traverse L1. Comme le même courant circule dans les lampes L2 et L3 et que ces lampes sont identiques à L1, l'électricité a besoin de la même force motrice que dans la lampe L1, c'est-à-dire 6 V, pour circuler dans ces lampes. Par conséquent, si nous passons du contact plus de la pile au contact moins en passant par les trois lampes, la tension est réduite à 0 V en 3 étapes de 6 V. Le contact plus doit donc être à 18 V.

Dans ces deux exemples, le potentiel à l'entrée d'une lampe était différent de celui à la sortie. Mais cette règle ne s'applique pas toujours. Une lampe, qui n'est pas traversée par un courant électrique, doit avoir le même potentiel à l'entrée et à la sortie, sinon il y aurait un courant. La Fig. 1.18 montre deux exemples.

Exercices

1. Les piles de la Fig. 1.19a sont des piles de 4,5 V. Marquez les points d'égalité de potentiel et indiquez les valeurs de potentiel pour toutes les sections du circuit.
2. Le courant électrique qui circule dans la pile de la Fig. 1.19b est de 1,6 A. Indiquez les points d'égalité de potentiel. Quel est le courant électrique dans les lampes ?
3. Le potentiel électrique au point C de la Fig. 1.20 est de 20 V. Les trois lampes sont identiques. Marquez les points d'égalité de potentiel. Indiquez les valeurs de potentiel des sections A, B et D des conducteurs. Quelle tension est fournie par la pile ? Que se passe-t-il avec les potentiels lorsque l'interrupteur est ouvert ?
4. La tension de la pile dans les Fig. 1.21a et Fig. 1.21b est de 12 V. Les lampes sont identiques. Marquez les points d'égalité de potentiel. Quelle est la valeur du potentiel au point P ? Quelles sont les différences de potentiel aux lampes L1 et L2 ? Le courant qui traverse la lampe L1 est-il plus important lorsque l'interrupteur est fermé (Fig. 1.21a) ou lorsqu'il est ouvert (Fig. 1.21b) ? Quand le courant qui traverse la lampe L2 est-il le plus important : lorsque l'interrupteur est ouvert ou lorsqu'il est fermé ?
5. La tension de l'alimentation électrique des Fig. 1.22a et Fig. 1.22 est de 150 V, les lampes sont identiques. Marquez les points d'égalité de potentiel. Indiquez les valeurs de potentiel de toutes les sections de conducteurs. Quelle lampe restera allumée si l'interrupteur est ouvert ?

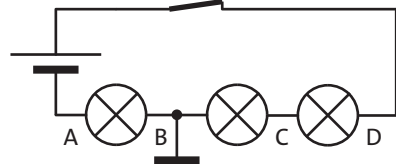


Fig. 1.20 Pour l'exercice 3

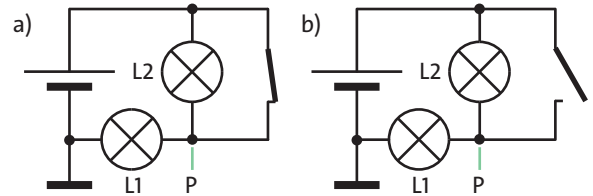


Fig. 1.21 Pour l'exercice 4

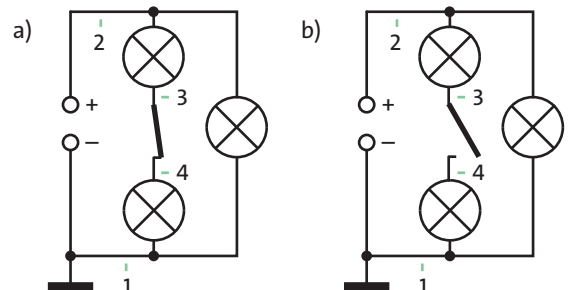


Fig. 1.22 Pour l'exercice 5



## 1.5 Courbes caractéristiques – la résistance électrique

Si nous voulons que l'électricité circule dans un objet, nous appliquons une tension : nous créons une force motrice. Chaque objet a tendance à entraver l'écoulement. Il oppose une résistance à l'électricité qui circule. On dit aussi : il a une résistance.

Certains objets ont une résistance élevée, ils ne conduisent le courant électrique que faiblement ou pas du tout. D'autres ont une faible résistance, ils sont de bons conducteurs d'électricité.

Les câbles électriques, par exemple, ont une faible résistance. Cela ne signifie pas pour autant qu'ils n'ont pas de résistance du tout.

La manière dont le courant électrique circule dans un objet et la façon dont il réagit à la tension appliquée peuvent être assez compliquées. Si la tension est augmentée, généralement le courant augmente aussi, mais pas toujours.

Nous souhaiterions analyser la relation entre la tension et le courant pour différents appareils électriques. La Fig. 1.23 montre comment procéder : nous connectons l'objet à analyser à une alimentation électrique dont la tension est réglable. La tension est lue sur l'alimentation. Le courant électrique qui est créé par la tension est mesuré avec un ampèremètre. Si nous reportons les valeurs du courant en fonction de la tension, nous obtenons *la courbe caractéristique* de l'appareil analysé.

La Fig. 1.24 montre la courbe caractéristique d'une lampe à incandescence (en haut) et d'une diode (en bas). Si vous ne savez pas à quoi sert une diode, vous pouvez le découvrir grâce à la courbe caractéristique : la courbe montre que la diode ne laisse passer le courant électrique que dans un seul sens. Elle fonctionne donc pour le courant électrique de la même manière qu'une valve de vélo fonctionne pour le courant d'air.

Pour certains objets ou dispositifs, le courant est proportionnel à la tension :

$$I \sim U.$$

Cette relation simple s'applique, par exemple, à un fil ordinaire, à condition que le courant ne soit pas assez élevé pour l'échauffer. On dit que le fil satisfait à la loi d'Ohm. La Fig. 1.25 montre les courbes caractéristiques de deux fils de longueur différente. Dans le cas d'une force motrice égale, le courant dans un fil est plus important que dans l'autre. Le fil avec le courant le plus fort a une résistance plus faible.

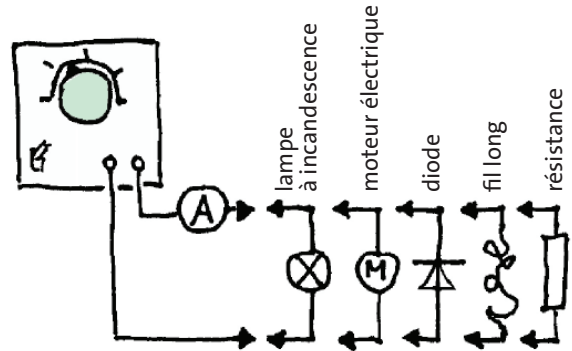


Fig. 1.23 Tracé des courbes caractéristiques : le courant électrique est mesuré pour différentes valeurs données de la tension.

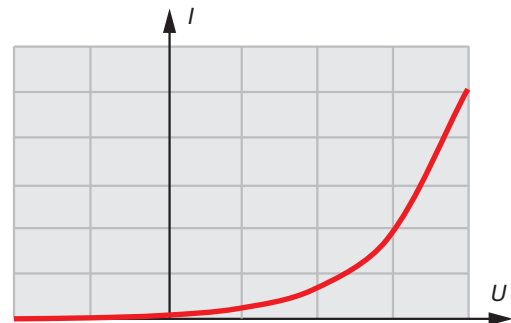
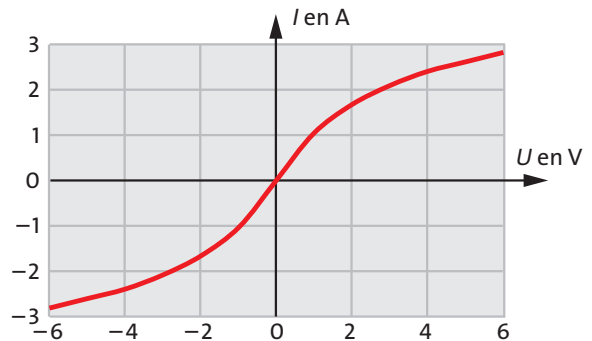


Fig. 1.24 Courbes caractéristiques d'une lampe à incandescence (en haut) et d'une diode (en bas)

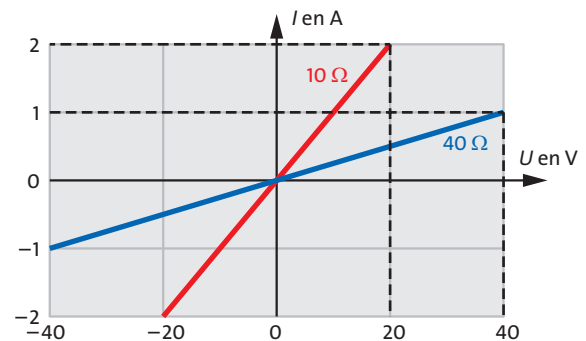


Fig. 1.25 Courbes caractéristiques de deux longs fils. Elles sont conformes à la loi d'Ohm.



Pour un conducteur électrique normal, la tension entre ses extrémités est proportionnelle au courant qui le traverse.

$$I \sim U \quad \text{Loi d'Ohm}$$

La résistance peut être caractérisée à l'aide du quotient de la tension et du courant. Plus la résistance du fil est élevée, plus ce quotient est grand. Par conséquent, le quotient lui-même est appelé *résistance du fil* et est désigné par la lettre  $R$ . Ainsi, nous avons

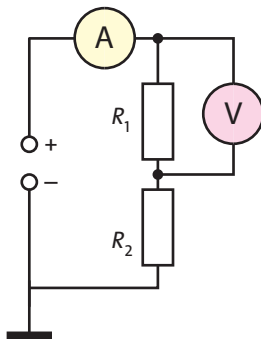
$$\text{Résistance électrique : } R = \frac{U}{I}.$$

La résistance  $R$  est une grandeur physique. Comme unité de mesure, on trouve le volt/ampère (V/A). L'Ohm, abrégé par la lettre grecque  $\Omega$  (prononcez oméga), est généralement utilisé à la place de l'unité composée volt/ampère. Par conséquent, nous avons

$$\Omega = \text{V/A}.$$

Nous pouvons maintenant indiquer la résistance de nos deux fils : les deux valeurs sont  $10 \Omega$  et  $40 \Omega$ .

a)



b)

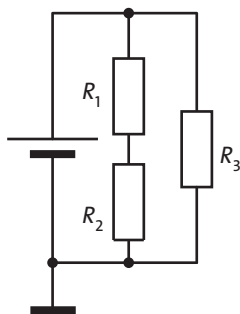


Fig. 1.26 (a) Pour l'exercice 4; (b) Pour l'exercice 5

Si la courbe caractéristique n'est pas une ligne droite, cela n'a pas de sens de calculer un quotient  $U/I$  puisque ce quotient aurait une valeur différente pour chaque point de la courbe caractéristique.

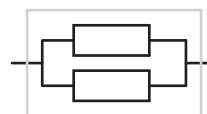
Dans le domaine de la technologie électrique et de l'électronique, il existe des cas où l'on souhaite « entraver » délibérément un courant électrique, c'est-à-dire où l'on souhaite avoir une résistance. C'est pourquoi des dispositifs ou « composants » sont créés dans le seul but de représenter une résistance pour un courant. Ces composants sont appelés des résistances. Les résistances sont construites de manière à avoir une courbe caractéristique linéaire. Elles obéissent à la loi d'Ohm et peuvent être caractérisées en indiquant une valeur de résistance, c'est-à-dire un nombre d'ohms.

Le symbole d'une résistance est un rectangle, comme le montrent les Fig. 1.23 et Fig. 1.26.

### Exercices

1. Une tension de 20 V est appliquée à une résistance inconnue. On mesure un courant électrique de 4 mA. Combien de  $\Omega$  la résistance a-t-elle ?
2. Une tension de 120 V est appliquée à une résistance de 2 k $\Omega$ . Quel est le courant électrique qui traverse la résistance ?
3. Un courant électrique de 0,1 mA traverse une résistance de 1 M $\Omega$ . Quelle est la tension sur la résistance ?
4. L'alimentation de la Fig. 1.26a crée une tension de 35 V. L'ampèremètre indique 5 A et le voltmètre 10 V. Quelle est la résistance de  $R_1$  ? Quelle est la tension à la résistance  $R_2$  ? Quelle est la résistance de  $R_2$  ?
5. La tension de la pile de la Fig. 1.26b est de 12 V. Chacune des résistances a 100  $\Omega$ . Donnez les valeurs de potentiel de toutes les sections de fil. Quelles sont les tensions aux trois résistances  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$  ? Quelles valeurs ont les courants électriques qui traversent les trois résistances ? Quelle est la valeur du courant électrique qui circule dans la pile ?
6. (a) Deux résistances de 100  $\Omega$  sont connectées en parallèle, Fig. 1.27. Quelle est la résistance de l'ensemble du montage ? Formulez une règle.  
(b) Deux résistances de 100  $\Omega$  sont connectées en série, Fig. 1.27b. Quelle est la résistance de l'ensemble du montage ? Formulez une règle.  
Ces règles vous semblent-elles familières ?

a)



b)

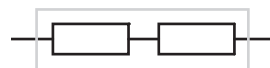


Fig. 1.27 Pour l'exercice 6

## 1.6 La résistance du voltmètre et de l'ampèremètre

Nous devons revenir à la question de savoir comment traiter les instruments de mesure du courant et de la tension, ou plus précisément : quelle est la résistance d'un ampèremètre et quelle est la résistance d'un voltmètre ?

L'ampèremètre est inséré dans un circuit dans lequel circule un courant électrique. Le courant ne doit pas changer du fait de l'installation de l'ampèremètre, Fig. 1.28. Cela signifie que la résistance de l'ampèremètre doit être aussi faible que possible. En fait, la résistance est si faible qu'elle peut être négligée dans la plupart des cas, c'est-à-dire qu'elle peut être considérée comme égale à zéro.

Ensuite, le voltmètre : le courant électrique doit circuler dans un circuit, c'est-à-dire à travers la batterie, la lampe et les fils correspondants. Il ne doit pas y avoir de « fuites ». Afin d'éviter un effet de fuite causé par le voltmètre, sa résistance doit être aussi élevée que possible. En fait, les voltmètres ont une résistance si élevée que le courant de fuite peut être négligé par rapport au courant qui circule dans la lampe, c'est-à-dire que nous pouvons supposer que la résistance est infiniment élevée.

Les ampèremètres ont une résistance très faible, les voltmètres une résistance très élevée.

### Exercice

1. Commentez la Fig. 1.29.

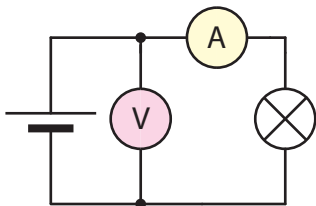


Fig. 1.28 La résistance d'un ampèremètre est très faible, celle d'un voltmètre est très élevée.

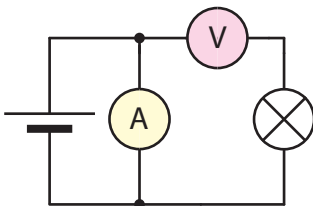


Fig. 1.29 Pour l'exercice 1

## 1.7 La conductivité électrique

De quelles propriétés d'un fil dépend sa résistance ?

Nous connectons un fil de résistance  $R$  à une alimentation électrique, Fig. 1.30a. Il y a un courant électrique  $I$ . Ensuite, nous connectons un deuxième fil en parallèle avec le premier, Fig. 1.30b. Maintenant, un courant  $I$  circule dans chacun des deux fils. Par conséquent, le courant total est :

$$I' = 2I.$$

Cela signifie que la résistance  $R'$  des deux fils parallèles ensemble est la moitié de celle d'un seul fil :

$$R' = R/2.$$

Nous pouvons maintenant considérer les deux fils ensemble comme un seul fil ayant une section transversale double. En conclusion, nous pouvons dire : *si la section transversale d'un fil est doublée, la résistance diminue de moitié par rapport à sa valeur initiale.*

Au lieu de connecter le deuxième fil en parallèle, nous le connectons au premier « en série », Fig. 1.30c.

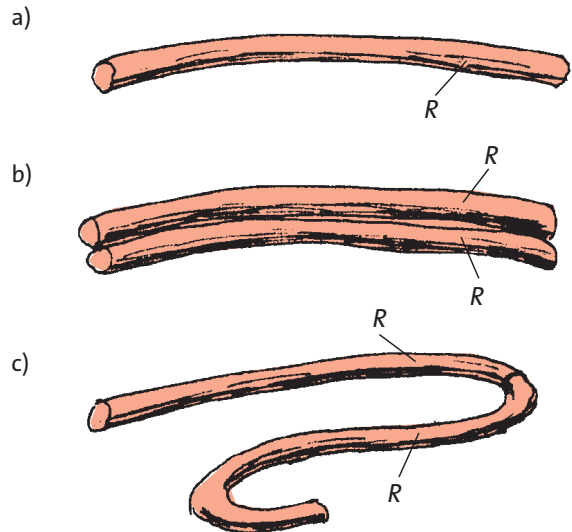


Fig. 1.30 (a) Un courant  $I$  circule dans un fil dont la résistance est  $R$ .

(b) Deux fils parallèles sont équivalents à un fil dont la section transversale est double. La résistance est deux fois moins élevée, le courant deux fois plus élevé qu'en (a).

(c) Deux fils en série sont équivalents à un fil dont la longueur est double. La résistance est deux fois plus élevée, le courant deux fois moins élevé qu'en (a).

Les deux fils doivent maintenant partager la différence de potentiel  $U$ , c'est-à-dire que sur chaque fil individuel, il n'y a qu'une tension  $U' = U/2$ . Par conséquent, le courant n'a que la moitié de sa valeur initiale :

$$I' = I/2.$$

Cela signifie que la résistance globale  $R'$  des deux fils connectés en série est le double de celle d'un seul fil :

$$R' = 2R.$$

De nouveau, les deux fils peuvent être considérés comme un seul, cette fois-ci avec une longueur double, et nous pouvons en conclure : *si la longueur d'un fil est doublée, la résistance sera également doublée.*

Les deux résultats peuvent être résumés ainsi :

$$R \sim \frac{d}{A}.$$

Ici,  $d$  est la longueur et  $A$  l'aire de la section transversale du conducteur.

La résistance dépend également du matériau dont est constitué le conducteur. Ceci est pris en compte par un autre facteur, à savoir la conductivité électrique  $\sigma$  :

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{d}{A}$$

$d$  = longueur

$A$  = aire de la section transversale

$\sigma$  = conductivité

Plus la conductivité d'un matériau est grande, plus sa résistance est faible. La conductivité se trouve donc au dénominateur de la formule.

Le tableau 1.1 indique la conductivité de quelques substances. Il est remarquable que les meilleurs conducteurs diffèrent des plus faibles par un très grand facteur, c'est-à-dire par environ  $10^{24}$ .

Matériau	$\sigma$ en $1/(\Omega \cdot m)$
Cuivre	$5,59 \cdot 10^7$
Aluminium	$3,7 \cdot 10^7$
Fer	$1,02 \cdot 10^7$
Eau distillée	$3,33 \cdot 10^{-5}$
Plexiglas	$10^{-13}$
PVC	$10^{-13}$
Silice fondue	$2 \cdot 10^{-17}$

Tab.1.1

## Exercices

1. Estimez la résistance du câble d'un touret de 50 m.
2. Quelle est la longueur d'un fil de cuivre qui a la même résistance qu'une barre de 1 m de PVC de même épaisseur ? Quelle distance le fil atteindrait-il à partir de là ?
3. La conductivité d'un matériau est d'autant plus élevée qu'il contient plus de porteurs de charge mobiles. Comment peut-on améliorer la conductivité d'une solution saline ?

## 1.8 Potentiel électrique et énergie

Nous suivons le parcours d'une petite quantité d'électricité  $\Delta Q$  dans un circuit électrique. Nous commençons à la borne moins de la source d'énergie électrique (la « pompe à électricité »), c'est-à-dire à son entrée. A l'intérieur de la source, la petite quantité d'électricité  $\Delta Q$  passe du potentiel bas  $\varphi_1$  au potentiel haut  $\varphi_2$ .

Pour passer de  $\varphi_1$  à  $\varphi_2$ , elle doit être alimentée en énergie dans la source. (Si la source est un générateur, cette énergie provient de l'arbre d'entraînement.) Nous appelons cette quantité d'énergie  $\Delta E$ . La petite quantité d'électricité continue ensuite à circuler dans le fil avec le potentiel élevé  $\varphi_2$  jusqu'à ce qu'elle arrive au récepteur d'énergie. Dans le récepteur d'énergie (un moteur électrique ou une ampoule électrique, par exemple), elle retourne du haut potentiel  $\varphi_2$  à  $\varphi_1$ . Elle libère ainsi l'énergie  $\Delta E$ . (Si le récepteur est un moteur électrique, cela se produit par l'intermédiaire de l'arbre du moteur ; si c'est une ampoule électrique, l'énergie s'en va avec la lumière). Ensuite,  $\Delta Q$  retourne à l'entrée de la source par la ligne de retour au potentiel bas.

Ainsi, notre petite quantité d'électricité  $\Delta Q$  absorbe la quantité d'énergie  $\Delta E$  dans la source et la libère dans le récepteur.

Vous vous souvenez peut-être de la relation :

$$P = U \cdot I = (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot I$$

Elle nous permet de calculer la quantité d'énergie par unité de temps transportée de la source au récepteur.

Si nous insérons

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

(c'est-à-dire le courant d'énergie est égal à la quantité d'énergie par unité de temps) et

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

(c'est-à-dire le courant électrique est égal à la quantité d'électricité par unité de temps) et multiplions par  $\Delta t$ , nous obtenons

$$\Delta E = (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot \Delta Q,$$

l'énergie qu'une quantité d'électricité  $\Delta Q$  absorbe dans la source et libère dans le récepteur.

Nous verrons plus tard où se trouve exactement cette énergie pendant le temps où la quantité d'électricité se déplace entre la source et le récepteur. L'énergie semble être située au même endroit que la quantité d'électricité, puisque cette énergie lui a été fournie. Pour l'instant, vous pouvez imaginer qu'il en est ainsi. Cependant, nous verrons plus tard que le système de stockage d'énergie réel n'est pas l'électricité elle-même. (Peut-être pouvez-vous déjà deviner où se trouve l'énergie si vous pensez à un autre système de stockage d'énergie : où sera stockée l'énergie fournie à un corps en le soulevant ?).

Il faut fournir de l'énergie pour faire passer l'électricité d'un potentiel faible à un potentiel élevé. De l'énergie est libérée lorsque l'électricité passe d'un potentiel élevé à un potentiel faible. Nous avons :

$$\Delta E = (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot \Delta Q.$$

## 1.9 Charge et porteurs de charge

Dans les cas où l'électricité se déplace dans un fil d'un côté à l'autre, nous parlons d'un courant électrique. Jusqu'à présent, nous avons analysé les effets des courants électriques et la relation entre la valeur du courant électrique et d'autres grandeurs physiques. Mais nous n'avons jamais posé de questions sur les effets et les caractéristiques de l'électricité elle-même. Il est préférable d'analyser l'électricité lorsqu'elle ne bouge pas, c'est-à-dire lorsqu'aucun courant électrique ne circule. Nous devons admettre que l'électricité dans un fil de cuivre qui n'est pas intégré dans un circuit électrique, ne peut pas être remarquée. Pourquoi ? Une réponse possible serait : l'électricité au repos n'a pas de propriétés détectables. Cette réponse, cependant, n'est pas correcte. L'électricité peut être ressentie très clairement, même si elle n'est présente qu'en très petites quantités. Sa description est traitée dans le domaine appelé l'électrostatique. Le fait que nous ne remarquions rien de l'électricité dans un morceau de fil de cuivre devant nous est dû à une propriété de l'électricité qui la rend

différente des autres grandeurs physiques : elle peut prendre des valeurs positives et négatives.

Toutes les substances matérielles contiennent de l'électricité, mais elles contiennent généralement des quantités égales d'électricité positive et négative, de sorte que la quantité totale est nulle. Par exemple, 1 g de cuivre contient 44 032 C d'électricité positive et la même quantité d'électricité négative ; la quantité totale est donc de 0 C. (En comparaison, la masse, c'est-à-dire la quantité qui est mesurée en kg, ne peut avoir que des valeurs positives.)

L'électricité peut prendre des valeurs positives et négatives.

Mais quel sens y a-t-il de dire qu'un corps, dont l'électricité s'élève à 0 C, possède en réalité une quantité bien définie d'électricité positive et une quantité égale d'électricité négative ? 0 C ne signifie-t-il pas qu'il n'y a pas d'électricité du tout ? Nous allons voir qu'il est effectivement logique de dire que le cuivre (ou tout autre matériau) contient à la fois de l'énergie positive et de l'énergie négative en examinant la structure microscopique du matériau.

Toutes les substances sont constituées d'atomes et de groupes d'atomes, les molécules, et chaque atome est composé de protons et de neutrons (situés dans le noyau) et d'une enveloppe d'électrons. Deux de ces composants atomiques sont porteurs d'électricité. Le proton transporte de l'électricité positive, c'est-à-dire

$$Q_{\text{proton}} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

L'électron transporte de l'électricité négative, c'est-à-dire

$$Q_{\text{électron}} = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

Les neutrons ne transportent pas d'électricité. On a donc

$$Q_{\text{neutron}} = 0 \text{ C.}$$

Comme un atome possède autant de protons que d'électrons, la quantité totale d'électricité de l'atome est de 0 C.

Dans certains cas, un atome peut avoir un ou plusieurs électrons en plus ou en moins. Une telle entité est appelée un ion. Ainsi, la quantité d'électricité d'un ion n'est pas nulle.

Dans ce contexte, nous avons également appris une autre caractéristique importante de l'électricité : elle

est toujours située sur une certaine particule. Outre les protons et les électrons, il existe d'autres particules chargées électriquement : les positons, les muons, les anti-protons et autres. Elles n'existent pas dans des conditions normales mais peuvent être créées artificiellement et n'ont qu'une durée de vie très courte.

Les particules sur lesquelles se trouve l'électricité sont dites chargées électriquement. L'électricité est donc généralement appelée *charge électrique*. Et les particules chargées électriquement, c'est-à-dire les électrons, les protons, les ions etc., sont appelées des *porteurs de charge*.

La charge électrique (= électricité) est toujours localisée sur des particules : les porteurs de charge.

## 1.10 Courant de charge et courant de porteur de charge

Nous pouvons maintenant comprendre en quoi les conducteurs électriques diffèrent des non-conducteurs : les conducteurs sont des matériaux qui contiennent des porteurs de charge mobiles ; dans les non-conducteurs ou *isolants*, tous les porteurs de charge sont immobiles. La nature des porteurs de charge mobiles dans un conducteur électrique peut être différente dans chaque cas. Dans certains conducteurs, seuls les porteurs de charge positifs se déplacent, dans d'autres uniquement les négatifs et dans d'autres encore à la fois les positifs et les négatifs.

Dans les métaux, les porteurs de charge mobiles sont des électrons. Cependant, tous les électrons des atomes métalliques ne peuvent pas se déplacer, mais généralement un seul par atome. Il n'y a pas d'électrons mobiles dans les acides, les bases et les solutions salines. Dans ce cas, la conductivité électrique est due aux ions mobiles. Comme il y a des ions positifs et négatifs, nous avons également des porteurs de charge avec des charges positives et négatives.

Si un courant électrique circule dans un circuit électrique, les porteurs de charge mobiles passent devant ceux qui restent de charge opposée, de sorte que le circuit électrique reste neutre partout. La charge nette de tous les fils, sources d'énergie et récepteurs d'énergie reste nulle.

Nous voyons qu'un courant électrique peut être réalisé de différentes manières. Dans les trois parties de la Fig. 1.31, nous avons un courant électrique de 2 A qui circule de gauche à droite. Dans la partie (a) de la figure, il est formé par des porteurs de charge positive

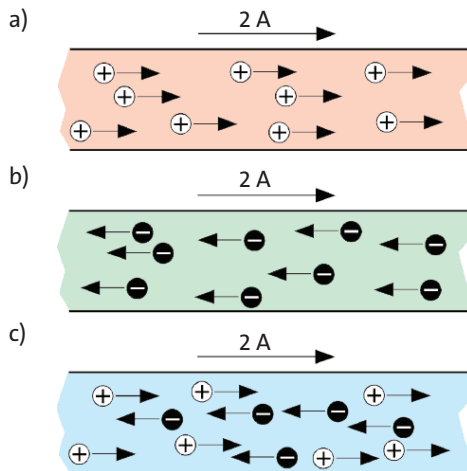


Fig. 1.31 Un courant électrique circulant vers la droite est réalisé par des porteurs de charge qui se déplacent (a) vers la droite, (b) vers la gauche et (c) dans les deux sens.

qui se déplacent vers la droite, dans (b), les porteurs de charge négative circulent vers la gauche. Dans la partie (c), les porteurs de charge positive se déplacent vers la droite et les porteurs de charge négative en même temps vers la gauche ; les deux types de porteurs de charge contribuent au courant total.

Vous serez surpris de la lenteur avec laquelle les porteurs de charge se déplacent dans un conducteur : si un courant électrique de 1 A circule dans un fil de cuivre dont la section transversale est de  $1 \text{ mm}^2$ , la vitesse des porteurs de charge mobiles (électrons mobiles) n'est que de 0,07 mm/s.

### Exercices

- Deux électrodes sont immergées dans une solution saline dans laquelle les ions positifs circulent de gauche à droite. Ils transportent 0,5 C par seconde. Dans le même temps, des ions négatifs circulent de la droite vers la gauche. Ils transportent 0,3 C par seconde de la droite vers la gauche. Dans quel sens le courant électrique circule-t-il ? Quelle est la valeur du courant électrique ?
- Un courant électrique de 2 A circule dans un fil de cuivre. Combien d'électrons se déplacent par seconde à travers une section transversale du fil ?

## 1.11 Accumulation de la charge électrique

Notre objectif initial était d'apprendre quelque chose sur les propriétés de l'électricité. Mais nous avons en-

suite expliqué pourquoi un circuit électrique normal est électriquement neutre partout, c'est-à-dire pourquoi la charge électrique ne se remarque généralement pas du tout. Nous aimerions maintenant vérifier si la neutralité d'un conducteur électrique peut être perturbée. Nous allons essayer d'accumuler une charge électrique sur un conducteur de sorte que sa charge totale soit différente de zéro. Nous verrons que cela présente quelques difficultés.

Pour mieux comprendre le problème qui va se poser, observons la Fig. 1.32.

Le récipient de gauche est rempli d'air à pression normale. Nous souhaitons augmenter la quantité d'air dans ce récipient. Pour cela, il suffit de pomper de l'air de l'extérieur vers le récipient. La pression augmente au cours de ce processus. Le récipient de droite sur la figure est rempli d'eau et nous souhaitons augmenter la quantité d'eau dans ce récipient. Mais ce n'est évidemment pas aussi facile que pour l'air. Même avec une pompe qui crée une pression très élevée, la quantité d'eau ne peut être augmentée que dans une très faible mesure. Cela est dû au fait que l'eau ne peut pas être comprimée aussi facilement que l'air.

Le comportement de l'électricité est similaire à celui de l'eau : il est très difficile de réaliser dans un objet un écart par rapport à la quantité normale d'électricité, c'est-à-dire 0 C.

Comment peut-on alors accumuler de l'électricité dans un objet ? Avec une « pompe à électricité », bien sûr, c'est-à-dire avec une pile ou une alimentation électrique. La Fig. 1.33 montre une expérience qui ne fonctionne pas : la borne plus d'une pile est reliée à un fil, la borne moins à la terre. La pile doit maintenant tirer de l'électricité de la terre et la pousser dans le fil. Le fil doit se charger d'électricité et rester chargé lorsqu'il est déconnecté de la pile. Si on le touche ensuite avec la borne d'une petite lampe dont l'autre borne est mise à la terre, la lampe devrait s'allumer parce que l'électricité accumulée est censée retourner à la terre à travers la lampe. Mais la lampe ne s'allume pas. Pourquoi ? Parce que la quantité d'électricité que nous avons injectée dans le fil est bien trop faible.

Pour fournir la preuve d'une charge accumulée sur le fil, nous devons améliorer l'expérience de deux façons :

(1) nous utilisons une pompe à électricité qui « pousse beaucoup plus », c'est-à-dire une alimentation qui crée une tension beaucoup plus élevée, ce peut être une alimentation haute tension classique (avec un transformateur) ou un générateur Van de Graaff, Fig. 1.34. Le générateur de Van de Graaff crée des tensions allant jusqu'à environ 50 kV.

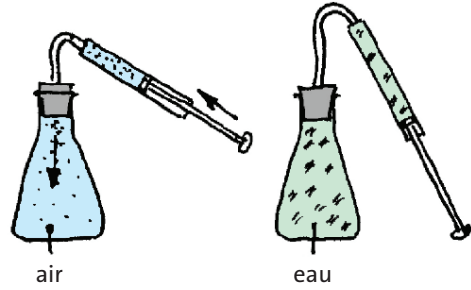


Fig. 1.32 La quantité d'air dans le récipient de gauche peut être modifiée facilement, la quantité d'eau à droite seulement avec beaucoup de difficulté.

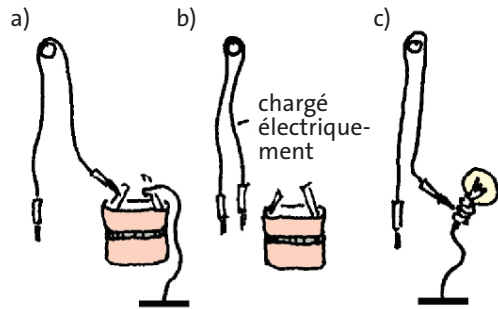


Fig. 1.33 (a) La pile pompe l'électricité de la Terre dans le fil. (b) Le fil est chargé électriquement. (c) La lampe ne s'allume pas car la charge du fil est beaucoup trop faible.

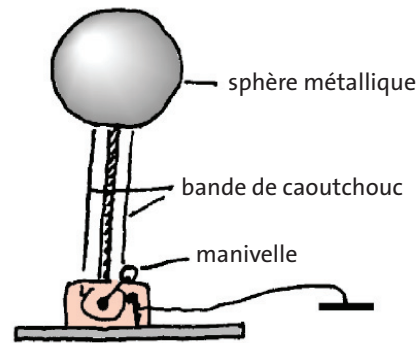


Fig. 1.34 Générateur Van de Graaff

(2) Pour détecter la charge sur le fil, nous utilisons un dispositif plus sensible, c'est-à-dire qui réagit à de plus petites quantités de charge que notre ampoule : une lampe à fluorescence. La lampe à fluorescence présente un avantage supplémentaire pour notre expérience : elle nous permet de voir dans quel sens le



courant circule à travers elle, car elle ne brille que du côté du potentiel le plus faible.

Avec ces améliorations, notre expérience d'accumulation de charge est réussie. La quantité d'électricité du fil est soit augmentée, soit réduite selon laquelle des deux bornes de l'alimentation haute tension est mise à la terre. Si le contact moins de l'alimentation est mis à la terre, le fil sera chargé positivement. Comme les porteurs de charge mobiles du fil sont des électrons, cela signifie que des électrons peuvent être retirés du fil. Il a donc moins d'électrons qu'à l'état neutre. Si le contact plus est mis à la terre et que le contact moins est connecté au fil, ce dernier devient négatif. Il a un excès d'électrons.

La quantité de charge accumulée augmente au fur et à mesure que l'on augmente le potentiel du fil. Un potentiel positif élevé est lié à une quantité (relativement) importante de charge positive ; un potentiel négatif élevé correspond à une quantité (relativement) importante de charge négative.

Nous pouvons résumer ce résultat :

Plus le potentiel électrique d'un corps est élevé, plus il contient de charges électriques.

La situation inverse est également vraie :

Plus la charge électrique qui se trouve sur un corps est importante, plus le potentiel électrique du corps est élevé.

Ces règles simples ne s'appliquent que tant qu'il n'y a pas d'autres corps chargés autour. Nous verrons plus tard que les corps chargés d'électricité s'influencent mutuellement.

N'oubliez pas que la quantité d'électricité que nous avons finalement accumulée dans notre expérience est encore extrêmement faible. Elle ne s'élève qu'à quelques  $\mu\text{C}$ . Comparez cela avec la charge positive globale qui se trouve sur les parties métalliques respectives, mais qui est compensée par une quantité presque identique de charge négative : il y a environ 44 000 C dans 1 g de cuivre (voir section 1.9).

## 1.12 Le champ électrique

Nous avons réussi à accumuler de la charge et à fournir des preuves de l'existence de cette charge. Mais nous n'avons pas encore remarqué de propriétés particulières de la charge électrique. Pour analyser les pro-

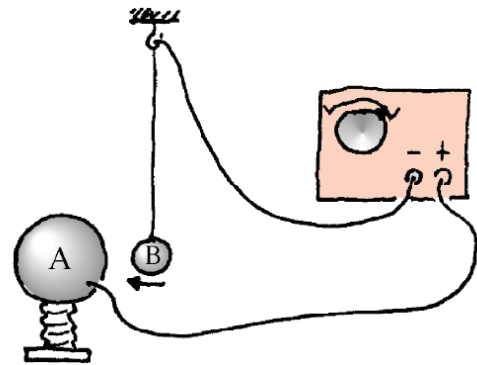


Fig. 1.35 La sphère B est attirée vers la sphère A au moyen du champ électrique.

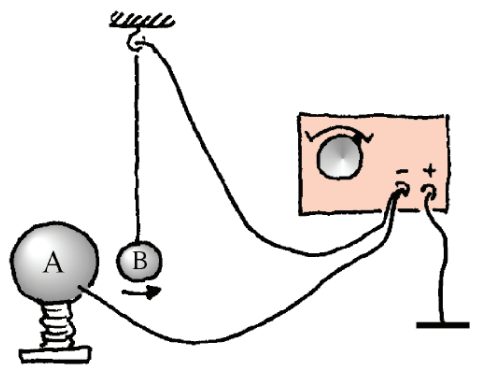


Fig. 1.36 Le champ électrique pousse la sphère B à s'éloigner de la sphère A.

priétés de l'électricité, nous réalisons l'expérience illustrée sur la Fig. 1.35.

Deux sphères métalliques creuses A et B sont reliées à une alimentation électrique à haute tension. La sphère B est très légère. Elle est suspendue à un fil fin de façon qu'elle peut se déplacer facilement. Si l'on met en marche l'alimentation électrique de sorte qu'une sphère soit chargée positivement et l'autre négativement, B est attirée vers A. Si nous chargeons négativement la sphère précédemment positive et positivement la sphère précédemment négative, rien ne change : B est à nouveau attirée vers A.

Nous connectons maintenant les sphères à l'alimentation électrique de manière à ce que leurs charges aient le même signe + ou -, Fig. 1.36. B s'écarte maintenant de A, que les deux sphères soient chargées positivement ou négativement.

Nous pouvons conclure qu'il existe une connexion entre les sphères, du fait qu'une sphère est attirée vers l'autre ou qu'elle s'écarte de l'autre.

Cette connexion est appelée *champ électrique*. Nous appelons substance de champ le « matériau » invisible dont est constitué le champ.

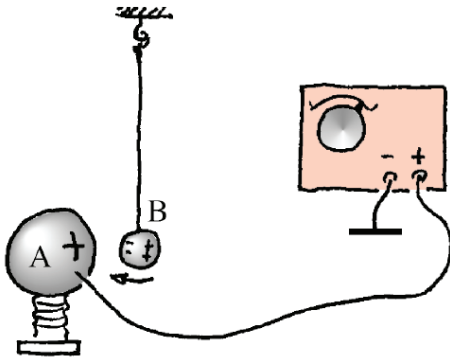


Fig. 1.37 Les porteurs de charge mobiles sur B sont déplacés par le champ électrique. Des zones chargées électriquement se développent à la surface de B.

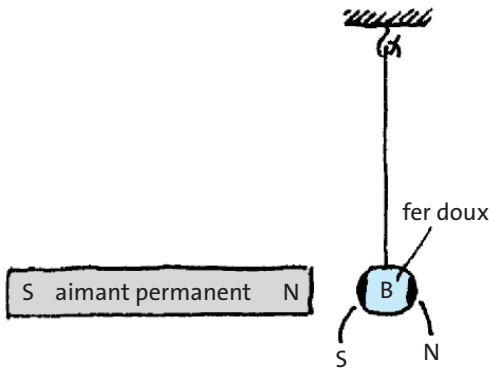


Fig. 1.38 B est magnétisé par le champ de l'aimant permanent. Des pôles magnétiques se développent à la surface de B.

Une entité invisible est attachée aux objets chargés électriquement. Cette entité est appelée champ électrique. Si les charges de deux objets ont le même signe + ou -, le champ éloigne les objets l'un de l'autre ; s'ils ont des signes + ou - différents, le champ les attire l'un vers l'autre.

Le fait que les objets puissent s'attirer et se repousser mutuellement au moyen du champ électrique signifie que de la quantité de mouvement circule d'un corps à l'autre. Par conséquent, le champ électrique transporte de la quantité de mouvement : des courants de quantité de mouvement circulent dans le champ électrique. Cela équivaut à l'affirmation selon laquelle la substance du champ est exposée à une contrainte mécanique.

Dans le champ entre deux corps, la quantité de mouvement peut circuler aussi bien vers la droite que

vers la gauche. Cela signifie qu'il peut y avoir à la fois une contrainte de compression et une contrainte de traction dans le champ électrique. Nous étudierons ultérieurement cette question plus en détail.

Pour l'instant, nous faisons une autre expérience encore plus simple que les précédentes, Fig. 1.37 : seule la sphère fixe A est chargée électriquement, la sphère B est non chargée et isolée. De manière surprenante, B est à nouveau attirée vers A, que A soit chargé positivement ou négativement. Comment cela peut-il s'expliquer ? Comme la sphère B n'est pas reliée à l'alimentation électrique, aucun champ ne devrait lui être attaché.

Nous pouvons trouver l'explication si nous nous rappelons un phénomène du magnétisme similaire : un morceau de fer doux, c'est-à-dire un objet qui n'est pas magnétique au départ, est attiré vers un pôle magnétique, et ce à la fois vers un pôle nord magnétique et un pôle sud magnétique. Ici, l'explication est la suivante : dès que le fer doux s'approche d'un pôle magnétique, il développe lui-même des pôles. Près d'un pôle nord, il développe un pôle sud sur le côté qui fait face au pôle nord et un pôle nord sur le côté opposé, Fig. 1.38.

C'est très similaire à notre dernière expérience. Le champ électrique tire sur les porteurs de charge de B et les déplace légèrement, de sorte que B soit chargée positivement d'un côté et négativement de l'autre. La charge globale de B reste nulle. Si A est chargée positivement, B devient négative sur le côté qui fait face à A et positive sur le côté opposé à A. Comme le côté négatif de B est moins éloigné de A que le côté positif, la sphère B est attirée vers A.

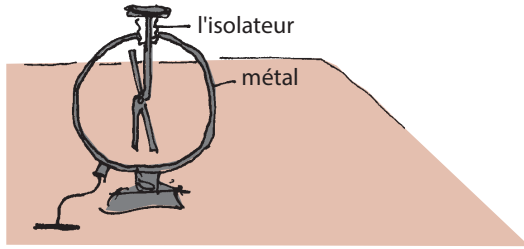
Si A est négative, les charges sur B se déplacent dans l'autre sens et les charges de A et du côté de B qui fait face à A ont à nouveau des signes +/ - opposés, de sorte que B est attirée vers A.

Ce processus de déplacement des charges sous l'influence du champ électrique d'un autre corps est appelé induction électrostatique.

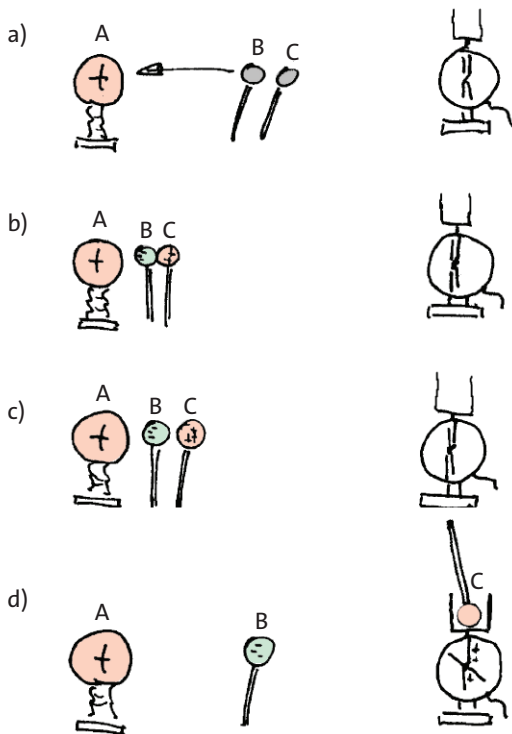
Pour prouver qu'un objet est chargé électriquement, nous avons utilisé précédemment une petite ampoule électrique. L'électroscope est un autre appareil permettant de prouver la présence d'électricité. Nous pouvons maintenant comprendre comment il fonctionne.

A l'intérieur de l'anneau métallique, Fig. 1.39, se trouve un barreau vertical. Ce barreau est isolé électriquement de l'anneau. Sur ce barreau, est fixé un autre barreau qui peut tourner. Ce barreau rotatif est très léger. Les deux barreaux sont connectés à la borne supérieure de l'électroscope de manière électriquement conductrice. L'anneau est mis à la terre.





**Fig. 1.39** Electroscopie. Le barreau mobile porte une charge de même signe +/- que le barreau fixe.



**Fig. 1.40** a) Les sphères neutres B et C sont rapprochées de A. Elles sont mises ensemble de façon à se toucher. (b) La charge sur B et C est déplacée (induction). (c) Le contact entre B et C est interrompu. (d) Les charges de B et C sont détectées avec l'électroscope.

Nous aimerions utiliser l'électroscope pour déterminer si une charge se trouve sur une sphère. Par conséquent, la borne supérieure de l'électroscope est mise en contact avec la sphère. La charge électrique passe de la sphère aux deux barreaux. Ces derniers sont maintenant chargés de manière égale et le barreau mobile est repoussé du barreau fixe par le champ électrique. Plus il y a de charge sur l'électroscope, plus le barreau mobile s'éloigne du barreau fixe.

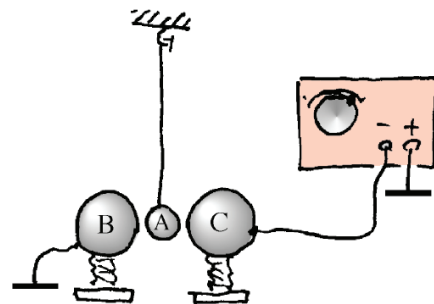
Nous utilisons l'électroscope pour montrer une fois de plus le phénomène d'induction électrostatique dans une expérience plus simple, Fig. 1.40.

La grande sphère était chargée positivement. Nous amenons deux sphères neutres B et C dans la zone de champ de la grande sphère, Fig. 1.40a. B et C sont mises ensemble de façon à pouvoir se toucher, mais elles ne touchent pas A, Fig. 1.40b. Le champ de A provoque la séparation des charges de B et C (induction électrostatique). À gauche, c'est-à-dire sur B, une charge négative s'accumule. À droite, c'est-à-dire sur la sphère C, la charge positive se concentre. Maintenant, nous séparons B et C l'une de l'autre alors qu'elles sont encore proches de A, Fig. 1.40c, puis nous les sortons de la zone de la grande sphère, Fig. 1.40d. Normalement, les charges sur B et C devraient se compenser à nouveau. Mais c'est impossible, car la connexion est interrompue.

Nous utilisons l'électroscope pour montrer que B et C sont chargées. Nous touchons l'électroscope avec l'une des deux sphères, par exemple avec B. De B, une charge négative circule vers l'électroscope, ce qui déclenche un signal. Ensuite, nous touchons l'électroscope avec la sphère C. L'électricité circule vers l'électroscope et neutralise la charge négative de sorte que le signal disparaît.

### Exercices

1. Sur la sphère B de la Fig. 1.37, les porteurs de charge positifs et négatifs sont séparés par induction. La sphère B est attirée vers A par le champ. Cependant, dès qu'elle a touché A, elle est repoussée de A. Comment cela peut-il s'expliquer ?
2. Comment pouvons-nous montrer que le champ situé à proximité d'objets chargés électriquement n'est pas un champ magnétique ?
3. Une sphère métallique légère A est suspendue entre deux sphères fixes B et C, Fig. 1.41. La sphère A est mise en contact un instant avec C et elle est ensuite relâchée. Que se passe-t-il ?



**Fig. 1.41** Pour l'exercice 3

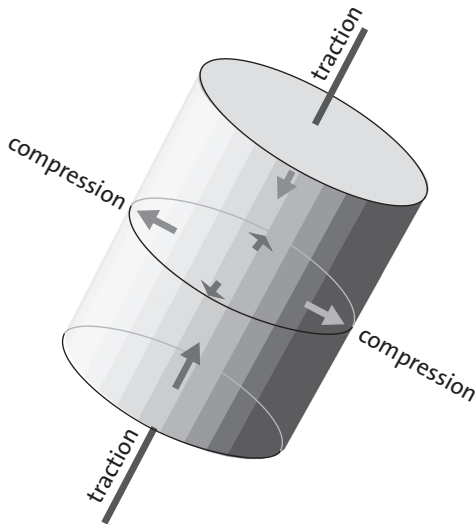
## 1.13 L'intensité du champ électrique

Supposons qu'il existe un champ électrique dans une zone donnée de l'espace (par exemple parce que cette zone est actuellement couverte par un nuage d'orage). Imaginez que vous souhaitiez indiquer à quelqu'un la quantité et le type de champ présent à un endroit donné de cette zone. Pour ce faire, vous avez besoin d'une mesure, d'une grandeur physique. Cette mesure est celle de *l'intensité du champ électrique*.

À première vue, on pourrait s'attendre à ce que l'intensité du champ électrique ait simplement une valeur élevée à proximité d'un corps chargé et une valeur plus faible plus loin des corps. Cependant, le champ ne peut pas encore être décrit de façon claire.

Nous avons vu qu'il pouvait y avoir à la fois des contraintes de compression et de traction dans le champ électrique. En fait, dans un champ il existe des contraintes de compression et de traction en *tout point et en même temps*. Comment cela est-il possible ?

Pour chaque petit morceau de substance de champ, il existe une direction bien définie dans laquelle le champ subit une contrainte de traction. C'est ce qu'on appelle la *direction de traction*. Dans toutes les directions qui lui sont perpendiculaires, la substance du champ est soumise à une contrainte de compression. La Fig. 1.42 montre un petit cylindre qui a été prélevé dans un champ de façon hypothétique, de manière à ce que l'axe du cylindre soit orienté dans la direction de traction du champ. Dans les directions qui lui sont perpendiculaires, il y a une contrainte de compression.



**Fig. 1.42** En chaque point, le champ a une direction particulière bien définie : la direction dans laquelle il y a une contrainte de traction.

(Le fait qu'un matériau ait une direction bien définie en chaque point n'est pas une caractéristique rare. Par exemple, la texture d'un morceau de bois a également une certaine direction en chaque point. Quelle caractéristique du bois dépend de la direction de la texture ?)

En conclusion : si nous voulons caractériser la substance du champ en un point du champ, il ne suffira pas de dire s'il y a beaucoup ou peu de substance du champ. En plus, nous devons indiquer la direction de traction en ce point. (Les directions de compression peuvent en être déduites sans ambiguïté.) En d'autres termes, l'intensité du champ électrique doit être un vecteur.

L'intensité du champ électrique est un vecteur.

- *Norme du vecteur* : mesure de la densité de la substance du champ.
- *Direction du vecteur* : direction de traction de la substance du champ.

La norme de ce vecteur témoigne de la densité du champ ; sa direction est celle de la direction de traction du champ.

Revenons à notre problème initial : nous aimerions indiquer à quelqu'un l'intensité du champ électrique en un point donné. Nous avons donc besoin d'une technique de mesure du vecteur intensité du champ. Il existe différentes méthodes pour cela. Nous allons en examiner une qui, bien qu'elle soit si peu pratique qu'elle n'est pratiquement pas utilisée, est particulièrement facile à comprendre — et c'est ce qui nous importe pour le moment.

Un petit « corps d'essai » chargé électriquement est placé à l'endroit où l'intensité du champ doit être mesurée. Un courant de quantité de mouvement circule alors dans ce corps d'essai. À l'aide d'un instrument de mesure du courant de quantité de mouvement (= dynamomètre), on détermine la quantité et la direction du vecteur de ce courant. Si l'on divise par la charge du corps d'essai, on obtient l'intensité du champ électrique :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}$$

Ensuite, nous transformons l'équation :

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E} \quad (1.1)$$

$\vec{F}$  = courant de quantité de mouvement circulant dans le corps

$Q$  = charge électrique du corps

$\vec{E}$  = direction de traction de la substance du champ.

## Représentation graphique des champs électriques

Nous avons ainsi : le courant de quantité de mouvement est égal à la charge électrique multipliée par l'intensité du champ électrique. Cette équation a la même forme que celle que nous connaissons déjà :

$$\vec{F} = m \cdot \vec{g}$$

c'est-à-dire, le courant de quantité de mouvement est égal à la masse multipliée par l'intensité du champ gravitationnel.

Si la charge du corps d'essai est doublée, le courant de quantité de mouvement sera également doublé. Le quotient de l'intensité du courant de quantité de mouvement et de la charge reste donc constant. Sa valeur est indépendante de la charge du corps d'essai, c'est-à-dire indépendante du moyen de mesure. Et c'est ainsi que cela doit être. Bien que le corps modifie considérablement le champ original, l'équation nous indique toujours l'intensité du champ sans le corps.

Pour l'unité de mesure de l'intensité du champ électrique, nous obtenons newton/coulomb. Cette valeur peut être convertie en l'unité plus courante volt/mètre.

Plus tard, vous découvrirez une autre technique de mesure de l'intensité du champ électrique.

### Exercices

1. Un électron est amené dans un champ électrique jusqu'à un point où l'intensité du champ est de 80 000 V/m. Comment la quantité de mouvement de l'électron change-t-elle ? (Quel est le taux de changement de la quantité de mouvement ?)
2. Un corps chargé électriquement est amené à un endroit P. Il porte une charge de 10 nC. On constate que le courant de quantité de mouvement qui circule dans le corps est de 0,02 N. Quelle était l'intensité du champ au point P avant que le corps chargé y soit amené ?

## 1.14 Représentation graphique des champs électriques

Dans la suite, nous aurons souvent besoin d'images de champs électriques. Nous devons donc examiner les possibilités de représentation graphique des champs électriques.

Si la contrainte de traction et de compression dans le champ, c'est-à-dire la direction du vecteur d'intensité du champ, n'est pas un aspect crucial, une méthode très simple peut être utilisée. La densité de la substance du champ est illustrée au moyen de nuances de gris : noir ou gris foncé là où la norme du vecteur d'intensité

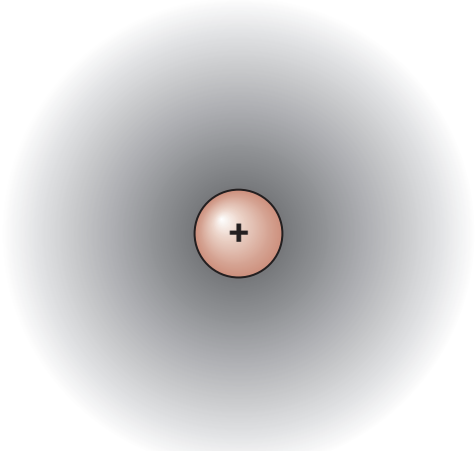


Fig. 1.43 Champ entourant une sphère chargée. Haute densité : ombre foncée ; basse densité : ombre claire.

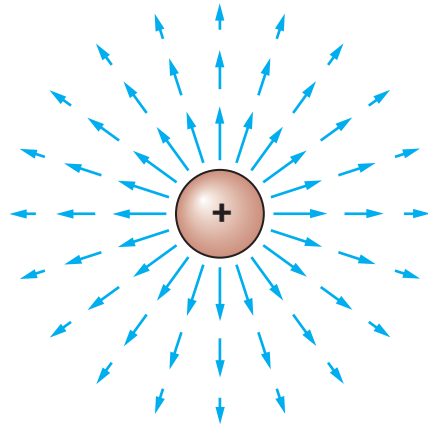


Fig. 1.44 Champ d'une sphère chargée, illustré par les flèches du vecteur d'intensité du champ.

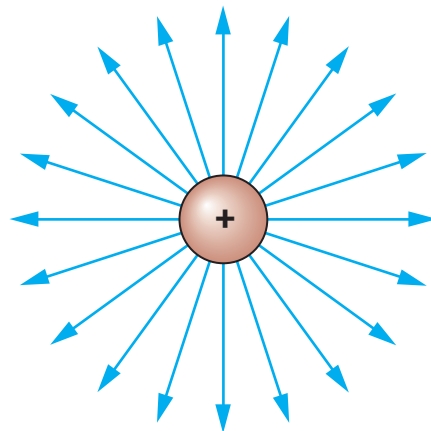
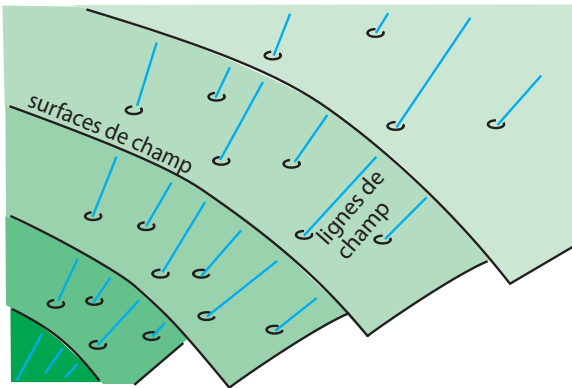
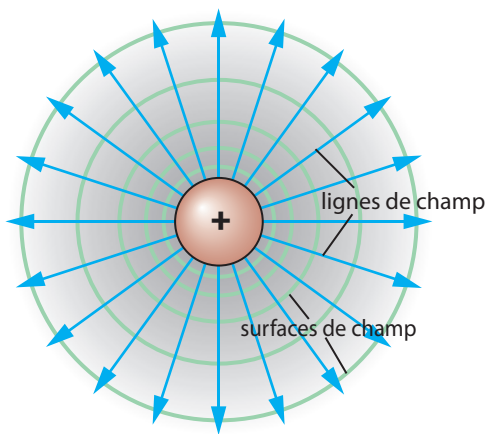


Fig. 1.45 Champ d'une sphère chargée, illustré par des lignes de champ.



**Fig. 1.46** Vue en perspective d'une section de champ. Les lignes de champ traversent perpendiculairement les surfaces de champ.



**Fig. 1.47** Champ d'une sphère chargée, illustré par des lignes de champ, des surfaces de champ et des nuances de gris.

du champ est grand et des nuances plus claires là où il est faible. La Fig. 1.43 montre le champ d'une sphère chargée. Nous constatons que le champ n'a pas de limite externe claire — comme l'atmosphère au-dessus de la surface de la Terre.

Une autre méthode de représentation est utilisée sur la Fig. 1.44. Les vecteurs d'intensité du champ  $y$  sont représentés par des flèches à intervalles réguliers. Cette image ne nous montre pas seulement la densité en chaque point, mais aussi la direction de traction.

Nous allons maintenant examiner la troisième méthode, la plus importante. Le champ est illustré à l'aide de *lignes de champ* et de *surfaces de champ*.

**Lignes de champ** : une ligne est tracée de manière à ce que chaque point de la ligne ait la direction du vecteur d'intensité du champ associé à ce point. C'est ainsi

que l'on obtient *une* ligne de champ. Ensuite, nous dessinons beaucoup de ces lignes de champ. La Fig. 1.45 montre ce que nous obtenons dans le cas d'une sphère chargée.

Il est courant de dessiner des flèches sur les lignes de champ qui pointent dans la même direction que les vecteurs d'intensité de champ.

**Surfaces de champ** : nous avons dessiné des lignes de champ sur notre papier bidimensionnel. D'abord, vous devez imaginer que les lignes de champ sont en fait situées dans un espace tridimensionnel. Nous pouvons maintenant construire des surfaces de telle sorte que les lignes de champ les traversent perpendiculairement en tout point (Fig. 1.46). Ces surfaces sont les surfaces de champ. Si nous faisons une image en coupe bidimensionnelle, chaque surface sera également visible sous forme de ligne. Ces lignes sont toujours perpendiculaires aux lignes de champ. Dans la suite de ce document, nous nous intéresserons principalement à ces images en coupe bidimensionnelle.

La Fig. 1.47 montre le champ de notre sphère chargée, représenté par des lignes de champ et des surfaces de champ en plus des nuances de gris.

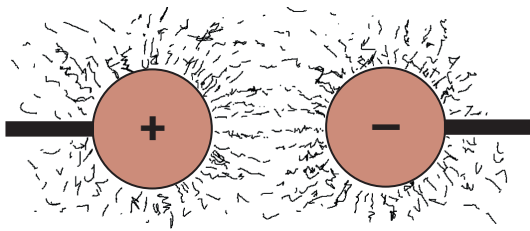
Nous avons appris comment un champ peut être représenté graphiquement. Bien entendu, cela n'est possible que si nous connaissons le champ, c'est-à-dire si nous connaissons les vecteurs d'intensité du champ aux différents points de l'espace.

## 1.15 Règles pour dessiner les champs électriques

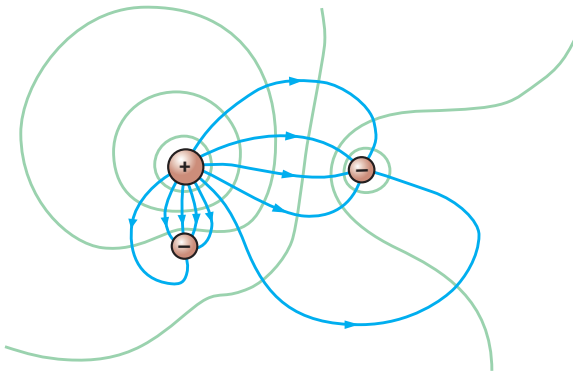
Considérons un arrangement de corps qui sont chargés électriquement, c'est-à-dire auxquels un champ électrique est attaché. Comment pouvons-nous savoir à quoi ressemble ce champ ? En d'autres termes, quelle est la forme des lignes et des surfaces de champ ? Il existe différentes réponses à cette question.

Première réponse : les vecteurs intensité de champ pour les différents points de l'espace peuvent être calculés sur la base de la distribution de la charge électrique. La méthode de calcul est assez compliquée, mais il existe des programmes informatiques qui peuvent faire le travail pour nous.

Deuxième réponse : les lignes et les surfaces de champ peuvent être visualisées expérimentalement. Une version particulièrement simple d'une telle expérience ressemble presque à une recette de cuisine : on verse de l'huile de ricin entre les corps chargés dont on veut analyser le champ. Ensuite, de la semoule est



**Fig. 1.48** Les lignes de champ sont visualisées à l'aide d'huile de ricin et de grains de semoule.



**Fig. 1.49** Les lignes de champ commencent sur des charges positives et se terminent sur des charges négatives. Les surfaces de champ sont fermées.

étalée sur l'huile. Les grains de semoule forment de petites chaînes qui sont orientées en chaque point dans la direction de traction du champ, Fig. 1.48 (l'expérience est similaire à celle qui consiste à visualiser les lignes de champ d'un champ magnétique au moyen de limaille de fer).

Troisième réponse : si l'image n'a pas besoin d'être exacte, il suffit de connaître quelques règles. Cette méthode est la plus importante pour nous en ce moment car chacune de ces règles nous renseigne sur un aspect important de la nature du champ. Nous voudrions donner ici un aperçu de ces règles.

Vous connaissez déjà la première : les lignes de champ sont toujours perpendiculaires aux surfaces de champ.

Une autre règle peut être identifiée si nous regardons de plus près la Fig. 1.49 : les lignes de champ se terminent sur des charges électriques ; les surfaces de champ, par contre, sont fermées. Des deux charges qui sont reliées par une ligne de champ, l'une est toujours positive et l'autre négative. La flèche que nous plaçons sur les lignes de champ pointe de la charge positive vers la charge négative. Par conséquent, la règle peut

également être formulée comme suit : les lignes de champ commencent sur des charges positives et se terminent sur des charges négatives. (Cependant, nous verrons plus tard des champs dans lesquels les lignes de champ n'ont ni début ni fin, alors que les surfaces de champ ne sont pas fermées.)

Si possible, les lignes de champ sont tracées de manière à ce qu'une ligne de champ corresponde à une quantité donnée de charge. Dans la Fig. 1.49, par exemple, le corps en haut à gauche porte 10 unités de charge positives, les deux autres portent chacun 5 unités négatives. Si la charge globale des corps illustrés n'est pas égale à zéro, les lignes de champ doivent quitter l'image. C'est le cas par exemple dans la Fig. 1.47. Ici, un seul corps chargé positivement est représenté. Par conséquent, toutes les lignes de champ doivent sortir de l'image.

Une autre règle stipule que les lignes de champ ne doivent jamais se croiser. Pour comprendre cela, nous n'avons pas besoin de regarder les figures : en un point, le vecteur de champ doit avoir une direction bien définie. Il ne peut pas avoir deux directions en même temps.

Autre règle simple : sauf à la surface des corps, les lignes de champ et les surfaces de champ ne présentent aucune discontinuité de pente.

Enfin, une autre règle très « puissante » : si la disposition des corps chargés est d'une certaine manière symétrique, l'image de la ligne de champ présentera la même symétrie.

En résumé :

En tout point, les lignes de champ sont perpendiculaires aux surfaces de champ.

Les lignes de champ commencent sur les corps chargés positivement et se terminent sur les corps chargés négativement. Plus la charge est importante, plus le nombre de lignes de champ qui commencent ou se terminent sur le corps est élevé.

Les lignes de champ ne se coupent pas entre elles. Les surfaces de champ ne se coupent pas entre elles.

Les lignes de champ et les surfaces de champ n'ont pas de discontinuités de pente.

Une image du champ a la même symétrie que les charges électriques.

La Fig. 1.50, tirée de la publication originale de James Clerk Maxwell de 1873, montre les lignes et les surfaces de champ à l'extrémité d'un condensateur. Maxwell a formulé la théorie des champs électriques et magnétiques qui est encore utilisée aujourd'hui.



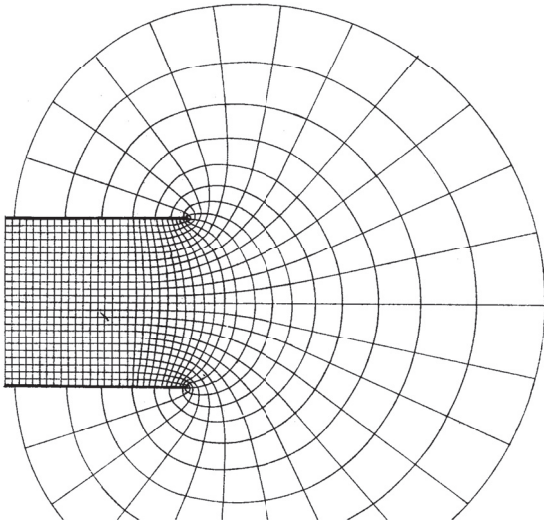


Fig. 1.50 Lignes de champ et surfaces de champ au bord d'un condensateur chargé, extraites du Traité d'électricité et de magnétisme de Maxwell.

**Exercices**

1. Dessinez les surfaces de champ sur la Fig. 1.51. (La figure montre les lignes de champ).
2. Dessinez les lignes de champ sur la Fig. 1.52. (La figure montre les surfaces de champ).
3. La Fig. 1.53 montre des surfaces de champ. Marquez les points où se trouvent les charges. Dessinez les lignes de champ.

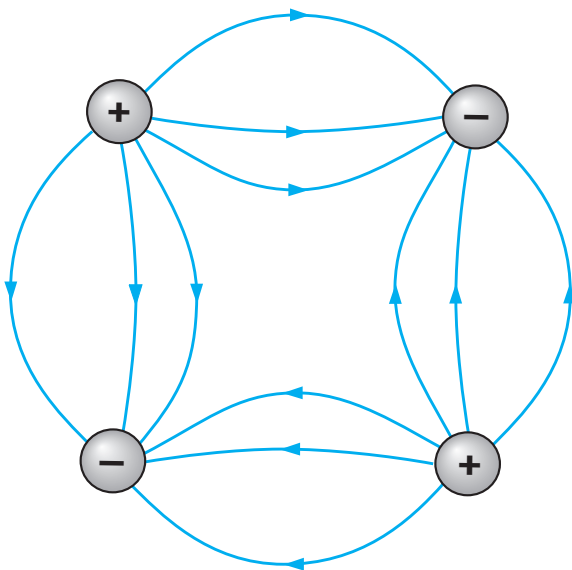


Fig. 1.51 Pour l'exercice 1

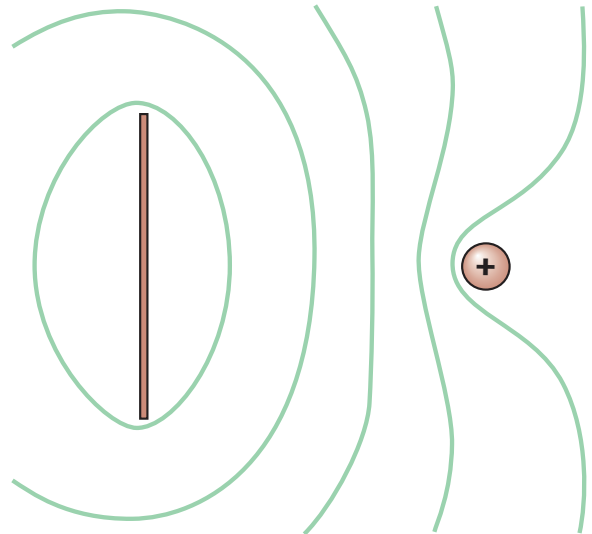


Fig. 1.52 Pour l'exercice 2



Fig. 1.53 Pour l'exercice 3

## 1.16 Quatre champs électriques importants

Nous rencontrerons à plusieurs reprises des distributions de charges particulières. Il est donc utile de mémoriser les images des champs correspondants.

### 1. Une sphère chargée

Nous connaissons déjà le champ. Il est représenté sur la Fig. 1.47. Nous voudrions encore nous convaincre que nous aurions également pu dessiner l'image en utilisant nos règles.

Les lignes de champ doivent commencer au niveau du corps chargé. Comme il n'y a pas d'autre corps, elles doivent toutes quitter l'image en direction de l'extérieur.

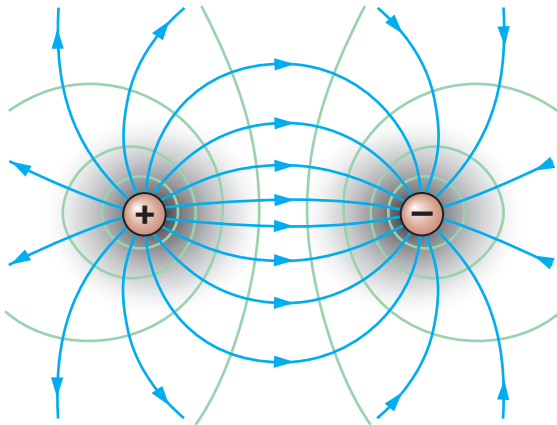


Fig. 1.54 Dipôle électrique avec son champ

Concernant la symétrie de la distribution des charges : si le corps chargé est tourné d'un angle aléatoire, nous ne pourrions pas distinguer la sphère tournée de celle qui n'a pas été tournée. La distribution de la charge est symétrique par rapport à la rotation pour tout angle. Le champ doit avoir la même symétrie.

Par conséquent, l'image du champ est déjà définie sans ambiguïté. Les lignes de champ sont orientées radialement vers l'extérieur, les surfaces de champ apparaissent comme des cercles concentriques.

## 2. Le dipôle électrique

Un dipôle est une structure constituée de deux corps adjacents qui ont les mêmes charges avec des signes +/- opposés : l'un est chargé positivement, l'autre porte une charge négative de même valeur. L'image du champ est représentée sur la Fig. 1.54.

Comme la quantité de charge négative est égale à celle de la charge positive, toutes les lignes de champ vont d'un corps à l'autre. Dans l'exercice 2 on pose des questions sur la symétrie de la distribution des charges.

## 3. Deux corps également chargés

La distribution des charges est semblable à celle du dipôle, mais les deux corps ont maintenant la même charge. Supposons que les deux charges soient positives, Fig. 1.55.

Comme il n'y a pas de corps chargés négativement, toutes les lignes de champ doivent sortir de l'image. Dans l'exercice 3 on pose des questions sur la symétrie de la distribution des charges.

## 4. Deux plaques avec des charges égales mais opposées

Dans ce cas également, la charge a la même quantité mais des signes +/- opposés, et elle est répartie de ma-

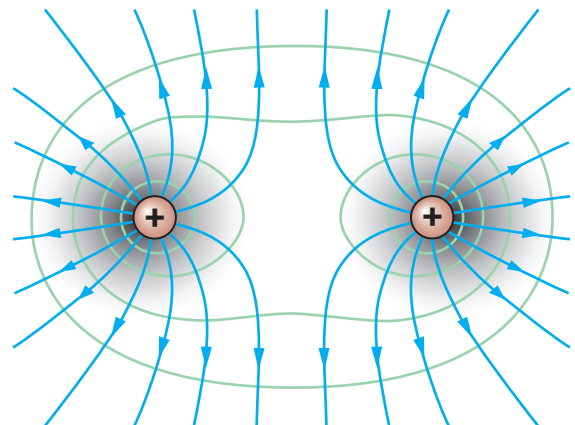


Fig. 1.55 Deux corps chargés positivement avec leur champ

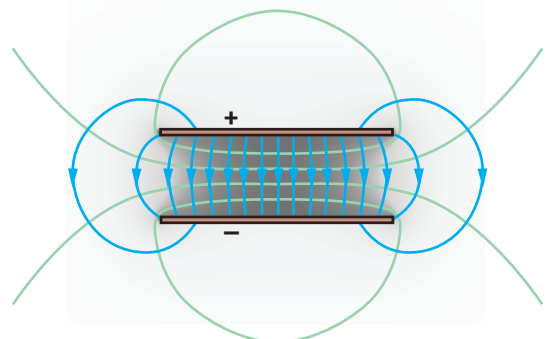


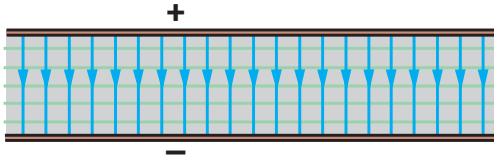
Fig. 1.56 Deux plaques de charges égales mais opposées avec leur champ

nière égale sur chacune des deux plaques. La Fig. 1.56 montre l'image pour le cas où la longueur des plaques est approximativement égale à trois fois leur distance.

Comme pour le dipôle, toutes les lignes de champ vont d'un corps à l'autre, c'est-à-dire d'une plaque à l'autre. Il est remarquable que le champ se concentre dans l'espace entre les plaques. Nous pouvons également constater que l'intensité du champ dans la zone centrale est très régulière : la direction et l'amplitude du vecteur d'intensité du champ ne changent pratiquement pas d'un point à l'autre. Le champ est presque *homogène*.

« Homogène » signifie « identique partout ». Si, par exemple, la température a la même valeur en chaque point d'une pièce, la distribution de la température est homogène.

Un champ homogène est le champ le plus simple que l'on puisse imaginer. Nous pouvons facilement réaliser un champ électrique presque homogène avec deux plaques. Plus l'extension des plaques est grande



**Fig. 1.57** Vue en coupe de deux plaques infiniment étendues avec des charges égales mais opposées

par rapport à leur distance, plus le champ sera régulier, plus il s'apparentera à un champ homogène. On imagine souvent que les plaques pourraient avoir une longueur et une largeur infinies. Dans ce cas, le champ entre les plaques serait parfaitement homogène et en dehors de celui-ci, l'intensité du champ serait exactement nulle. La Fig. 1.57 montre une section d'une telle paire de plaques, ainsi que son champ.

**Exercices**

1. Une sphère porte la charge  $Q_0$ . La charge se trouve (a) sur la surface de la sphère, ou est (b) répartie à l'intérieur de la sphère. En quoi l'image de la ligne de champ à l'extérieur de la sphère est-elle différente entre le cas a et le cas b ? Expliquez.
2. Quelles sont les symétries de la distribution de charge du dipôle électrique de la Fig. 1.54 ? Vérifiez si le champ a la même symétrie. Tenez compte des signes +/- de la charge. Formulez une extension de la règle concernant la relation des symétries de la charge et du champ.
3. Quels sont les symétries de la distribution de charge de la Fig. 1.55 ? Le champ a-t-il la même symétrie ?

## 1.17 Calcul de l'intensité des champs électriques

Le calcul de l'intensité du champ pour une distribution de charge donnée est généralement difficile, mais pas dans quelques cas importants — par exemple si la distribution de charge est à symétrie sphérique. Nous considérons une sphère chargée électriquement dont la charge est répartie dans tout l'intérieur. La *densité de charge* est supposée être la même en tout point de la sphère. La norme du vecteur d'intensité du champ à l'extérieur du corps est alors décrit par l'équation suivante :

$$|\vec{E}(r)| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \tag{1.2}$$

constante électrique  $\epsilon_0 = 8,54 \cdot 10^{-12} \text{ C}/(\text{V} \cdot \text{m})$

où

$Q$  = charge électrique

$r$  = distance au centre de la distribution de charge

$\epsilon_0$  = constante électrique.

Le facteur  $1/(4\pi\epsilon_0)$  est également une constante.

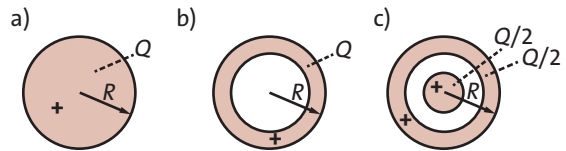
Cette équation vous semble-t-elle familière ? Elle a la même structure que l'équation de l'intensité du champ gravitationnel des corps à symétrie sphérique :

$$|\vec{g}(r)| = G \cdot \frac{m}{r^2}$$

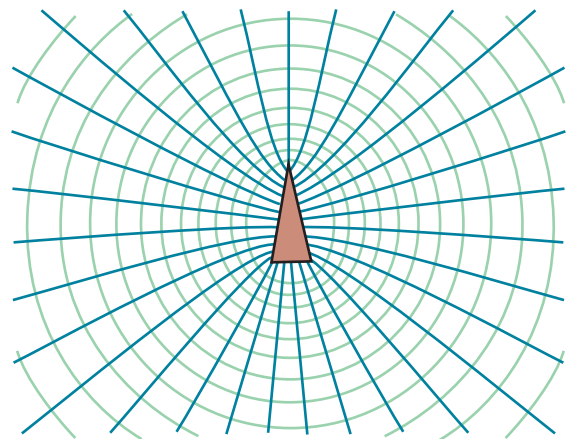
Nous connaissons déjà la direction des vecteurs d'intensité du champ : si la charge est positive, ils sont dirigés radialement vers l'extérieur.

La loi en  $1/r^2$  de l'équation (1.2) est plus couramment utilisée qu'on ne le pense à première vue.

Par conséquent, elle n'est pas seulement valable pour le champ d'une sphère chargée de manière homogène, mais aussi pour toute autre distribution de charges à symétrie sphérique ; toutefois, uniquement en dehors de l'espace dans lequel se trouve la charge.



**Fig. 1.58** Pour chaque distribution de charges, la loi en  $1/r^2$  s'applique pour une distance au centre supérieure à  $R$ .



**Fig. 1.59** Lignes de champ (en bleu) et surfaces de champ (en vert). À une grande distance d'une distribution de charges, le champ devient à symétrie sphérique et la loi en  $1/r^2$  s'applique.



## Plusieurs corps chargés – addition de vecteurs

La Fig. 1.58 montre trois distributions de charges à symétrie sphérique. La charge totale, c'est-à-dire  $Q$ , est la même pour toutes ces distributions. L'équation (1.2) s'applique aux trois, mais uniquement pour les rayons supérieurs à  $R$ .

Cependant, la loi en  $1/r^2$  peut également être utilisée si la distribution de charges n'est pas à symétrie sphérique, car elle s'applique à toutes les distributions de charges si nous sommes à une distance suffisante. La Fig. 1.59 montre une distribution de charges dont la section transversale a la forme d'un triangle à angle aigu. À une certaine distance, les lignes de champ sont presque des lignes droites et les surfaces équipotentielles sont presque des sphères. Lorsque c'est le cas, la loi en  $1/r^2$  peut également être appliquée.

### Exercices

1. Sur la Fig. 1.58, la charge  $Q/2$  sur la sphère intérieure est remplacée par  $-Q/2$ . À quoi ressemble maintenant le champ pour  $r > R$  ?
2. Insérez l'expression de l'intensité du champ de l'équation 1.2 dans l'équation 1.1. Soyez bien conscient de ce que vous faites. Quelle est la signification de  $Q$  dans l'équation 1.1 et quelle est la signification de  $Q$  dans l'équation 1.2 ? Quelle est la signification de  $r$  ? Si vous avez tout fait correctement, vous avez obtenu la loi de Coulomb. Cherchez une loi analogue en mécanique.

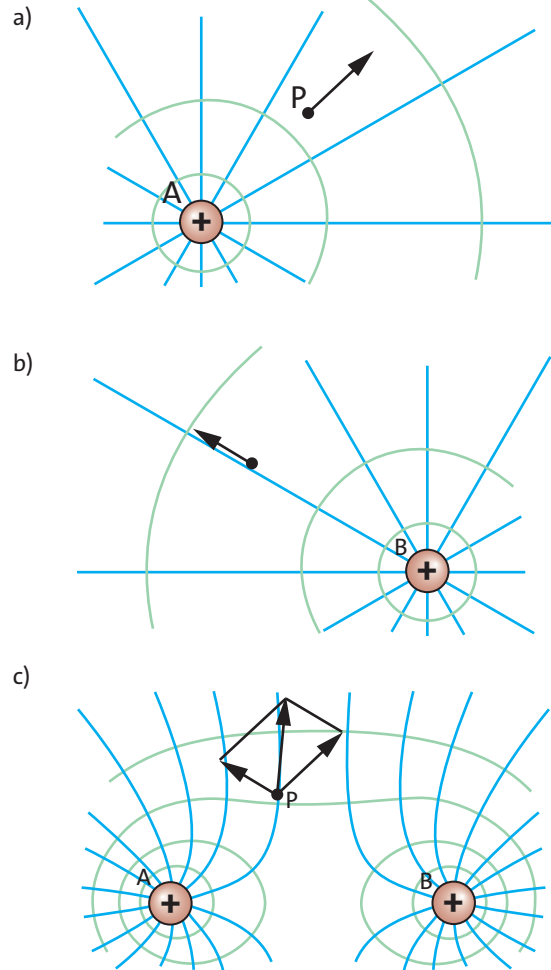
## 1.18 Plusieurs corps chargés – addition de vecteurs

Nous allons essayer d'amener deux champs en un même point, par exemple les champs de deux sphères chargées A et B. A et B portent la même charge.

Mais comment peut-on amener un champ d'un point à un autre ? En déplaçant le corps chargé auquel il est attaché. Déplaçons donc l'une des sphères chargées tout contre l'autre.

Que se passe-t-il ? Le champ de A empêche-t-il le champ de B de se fondre en lui ? Ou bien deux champs peuvent-ils se trouver en un point au même moment ? Ni l'un ni l'autre de ces cas ne se présente. Quelque chose d'autre et d'étonnamment simple se produit. Il en résulte un champ dont l'intensité est obtenue par l'addition vectorielle des intensités des champs individuels, Fig. 1.60.

La Fig. 1.60a montre la sphère A avec son champ. Il n'y a pas d'autres corps chargés à proximité. La Fig. 1.60b montre la sphère B seule avec son champ. La Fig. 1.60c montre enfin le cas où il y a les deux sphères.



**Fig. 1.60** (a) Sphère A avec son champ. (b) Sphère B avec son champ. (c) Sphères A et B avec leur champ. L'intensité du champ est obtenue par addition de vecteurs.

Nous sommes intéressés par l'intensité du champ au point P. Nous supposons que nous connaissons les vecteurs d'intensité du champ dans le cas où il n'y a qu'une seule sphère, c'est-à-dire soit seulement A, soit seulement B. Ces vecteurs sont représentés sur les Fig. 1.60a et Fig. 1.60b. Nous obtenons l'intensité du champ en P pour le cas où il y a deux sphères en additionnant les deux vecteurs d'intensité de champ, Fig. 1.60c. C'est ainsi que l'on peut obtenir l'intensité du champ en chaque point à partir des intensités de champ des charges individuelles.

À l'aide de nos nouvelles connaissances nous aimerions maintenant obtenir une règle générale utile. Nous allons la déduire sur la base d'un exemple facile et la généraliser par la suite. Nous examinons le champ

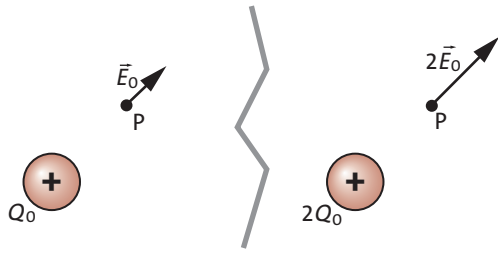


Fig. 1.61 Si la charge est doublée, l'intensité du champ électrique sera doublée en chaque point du champ.

d'une sphère qui porte la charge électrique  $Q_0$ . L'intensité du champ en un point P choisi au hasard est  $\vec{E}_0$ , Fig. 1.61a.

Nous amenons maintenant une autre charge  $Q_0$  au point de la charge initiale, Fig. 1.61b. En d'autres termes : la sphère qui avait auparavant la charge  $Q_0$  porte maintenant la charge  $2Q_0$ . Quelle est la nouvelle intensité du champ ? Comment l'intensité du champ électrique change-t-elle en un point lorsque la charge électrique créée par le champ est doublée ? Nous savons comment calculer la nouvelle intensité de champ, à savoir par l'addition vectorielle des contributions des charges individuelles : intensité de champ créée par la première charge  $Q_0$  plus intensité de champ créée par la seconde charge  $Q_0$ . Comme les deux vecteurs sont égaux, le résultat est un vecteur qui a la même direction que  $\vec{E}_0$  mais deux fois plus long. Par conséquent, la nouvelle intensité de champ est simplement  $2\vec{E}_0$ .

Ce résultat peut être généralisé :

Si toutes les charges d'une distribution de charges sont multipliées par un facteur  $k$ , les normes de toutes les intensités de champ seront multipliées par le facteur  $k$ . Les directions des intensités de champ ne changeront pas.

L'addition vectorielle est également utilisée par l'ordinateur pour calculer les distributions de champ. Nous imaginons que la distribution des charges est composée de nombreuses petites charges ponctuelles. Chacune d'entre elles crée un champ dont l'intensité peut être calculée selon l'équation (1.2). L'ordinateur calcule la contribution à l'intensité du champ de toutes les charges ponctuelles pour un point P1 donné et les additionne selon la règle de l'addition vectorielle. Le résultat est l'intensité du champ en P1. On procède de la même manière pour tous les autres points P2, P3 ... pour lesquels on souhaite obtenir l'intensité du champ (généralement pour tous les pixels de l'écran de l'ordinateur).

**Exercices**

- Deux petites plaques de charges égales mais opposées sont amenées transversalement entre deux autres grandes plaques (Fig. 1.62). Les grandes plaques ont également des charges égales mais opposées. Les normes des champs doivent être égales (avant d'introduire la petite paire de plaques dans la grande). Quelle est l'intensité du champ dans l'espace entre les petites plaques ?
- Le champ de la paire de plaques infiniment étendues de la Fig. 1.57 peut être considéré comme composé du champ de la plaque supérieure et de celui de la plaque inférieure. A quoi ressemble le champ de la plaque supérieure seule ? À quoi ressemble le champ de la plaque inférieure seule ? Qu'en résulte-t-il pour le champ des deux plaques ?
- La valeur absolue de toutes les charges des Fig. 1.63a et Fig. 1.63b est la même. Déterminez la direction du vecteur intensité de champ aux points A, B, C et D.

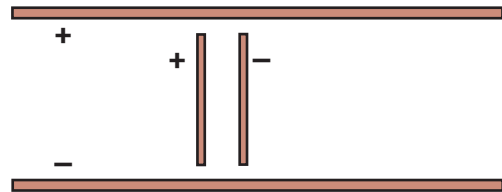


Fig. 1.62 Pour l'exercice 1

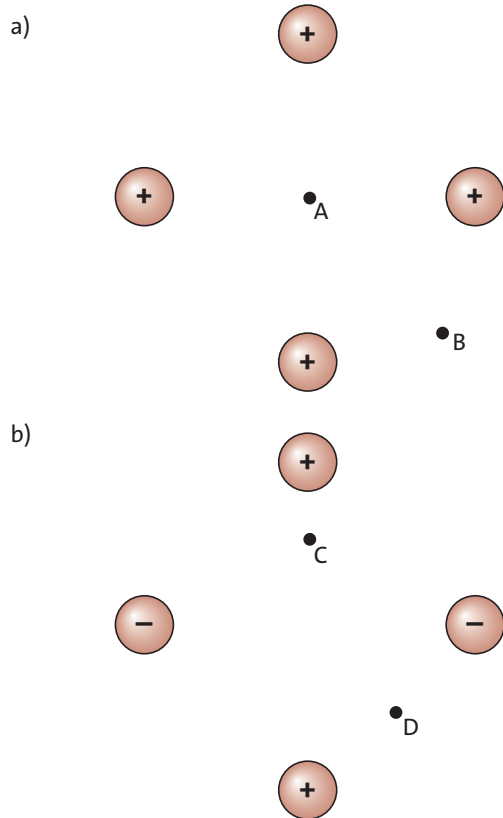
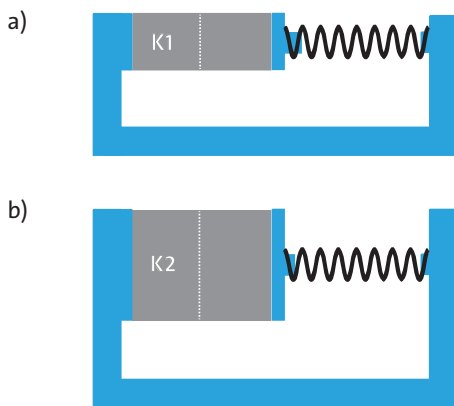


Fig. 1.63 Pour l'exercice 3

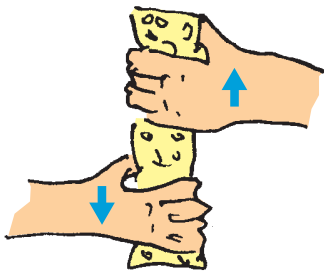
## 1.19 Compression et traction dans le champ électrique

Nous avons vu que le champ électrique est dans un état de contrainte mécanique. En chaque point, il est soumis à une contrainte de traction dans une direction et à une contrainte de compression dans les directions transversales. Aux endroits où l'intensité du champ est élevée, c'est-à-dire là où la substance du champ est dense, les contraintes sont fortes. La contrainte mécanique est une grandeur physique qui peut être décrite par des nombres. Nous allons voir comment cela se passe avec un exemple un peu plus facile que celui du champ électrique.

Un bloc K1 est serré entre deux parois au moyen d'un ressort, Fig. 1.64a. Un courant de quantité de mouvement circule dans le dispositif. Nous le comparons maintenant avec le bloc K2 de la Fig. 1.64b. Comme les ressorts sont identiques, les courants de



**Fig. 1.64** Les blocs K1 et K2 sont traversés par le même courant de quantité de mouvement. La densité de courant de quantité de mouvement (= contrainte mécanique) est plus élevée dans le bloc K1 que dans le bloc K2.



**Fig. 1.65** L'intérieur de l'éponge est exposé à une contrainte de traction dans une direction verticale et à une contrainte de compression dans une direction horizontale.

quantité de mouvement sont les mêmes dans les deux cas. Cependant, comme le bloc K2 a une section transversale plus grande que K1, le courant de quantité de mouvement s'étend sur une plus grande surface. Dans K2, le courant de quantité de mouvement par unité de surface est plus faible que dans K1 ; en d'autres termes, la *densité de courant de quantité de mouvement* est plus faible dans K2.

Le symbole de la densité de courant de quantité de mouvement est  $\sigma$ .

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ densité de courant de quantité de mouvement}$$

La « contrainte mécanique » n'est qu'un autre nom pour la densité de courant de quantité de mouvement :

$$\sigma = \text{contrainte mécanique} \\ = \text{densité de courant de quantité de mouvement}$$

Nous allons maintenant exposer en même temps un objet à une contrainte de compression et à une contrainte de traction, par exemple une éponge pour tableau noir, Fig. 1.65. Nous la saisissons à deux mains et la comprimons par le côté ; en même temps, nous tirons dans le sens longitudinal. L'intérieur de l'éponge est maintenant exposé simultanément à la compression et à la traction : compression dans le sens de la droite vers la gauche, et traction dans le sens du haut vers le bas. Bien entendu, elle pourrait aussi être exposée à la traction ou à la compression dans les deux sens respectivement. Dans tous les cas, les deux contraintes de compression ou de traction peuvent avoir des valeurs différentes.

Enfin, nous pouvons également soumettre l'éponge à une contrainte de compression ou de traction dans la troisième direction spatiale, celle de l'avant vers l'arrière, en la poussant ou en la tirant en conséquence.

Vous pouvez maintenant imaginer que nous pourrions continuer ainsi, que d'autres valeurs de compression différentes pourraient être produites dans d'autres directions spatiales. Pourquoi pas cinq valeurs de compression (ou valeurs de contrainte de traction) différentes dans cinq directions différentes ? Mais cela n'est pas possible. Dès que nous essayons de modifier la contrainte dans une quatrième direction, la contrainte change automatiquement dans les trois premières directions.

Nous obtenons donc le résultat suivant :

$$\text{La contrainte mécanique peut avoir des valeurs différentes dans trois directions qui sont perpendiculaires les unes aux autres.}$$

Dans les corps solides, ainsi que dans des corps tels qu'une éponge, les trois directions et les valeurs de contraintes correspondantes peuvent être fixées arbitrairement (du moins tant qu'elles ne sont pas suffisamment élevées pour briser le corps).

Cependant, il existe des systèmes dans lesquels les trois contraintes sont liées les unes aux autres d'une manière particulière.

Dans les liquides ou les gaz, par exemple, les trois contraintes sont toujours égales. Elles sont alors simplement appelées pression.

Liquides et gaz :  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = p$

Pour en revenir au champ électrique, nous savons déjà qu'il existe une contrainte de traction dans une direction et une contrainte de compression dans la direction perpendiculaire correspondante. Une règle simple s'applique pour les valeurs de ces contraintes : la contrainte de traction a la même norme que la contrainte de compression, c'est-à-dire :

Champ électrique :  $\sigma_{\parallel} = -\frac{\epsilon_0}{2} |E|^2$      $\sigma_{\perp} = \frac{\epsilon_0}{2} |\vec{E}|^2$

$\sigma_{\parallel}$  est la contrainte dans la direction des lignes de champ ; elle est négative, c'est-à-dire qu'il s'agit d'une contrainte de traction.  $\sigma_{\perp}$  est la contrainte perpendiculaire aux lignes de champ ; elle est positive, c'est-à-dire qu'il s'agit d'une contrainte de compression.  $|\vec{E}|$  est la norme de l'intensité du champ électrique. (Afin d'éviter toute confusion avec l'énergie  $E$ , nous avons ajouté une flèche vectorielle et des barres au symbole de l'intensité du champ).  $\epsilon_0$  est la constante électrique :

Constante électrique  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}/(\text{V} \cdot \text{m})$

Nous pouvons maintenant comprendre pourquoi et comment les corps s'attirent et se repoussent. Nous aimerions prédire dans quelle direction le champ repousse ou attire un corps chargé, uniquement en regardant l'image du champ.

Il suffit de savoir qu'il existe une contrainte de traction dans la direction des lignes de champ et une contrainte de compression dans la direction transversale correspondante, c'est-à-dire dans la direction des surfaces de champ.

### 1. Une paire de plaques

La Fig. 1.66 montre à nouveau l'image du champ. Nous observons le champ dans la zone délimitée par la ligne pointillée. Les lignes de champ quittent la plaque su-

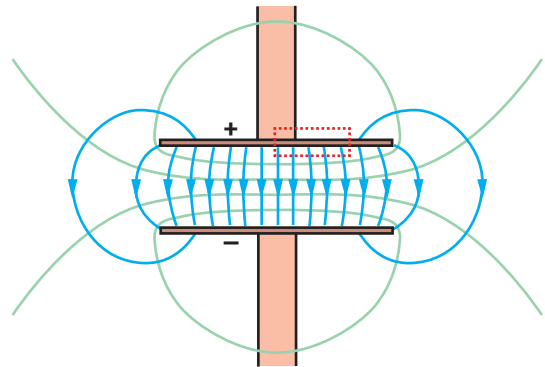


Fig. 1.66 Le champ tire vers le bas sur la partie de la plaque supérieure qui est encadrée par une ligne pointillée.

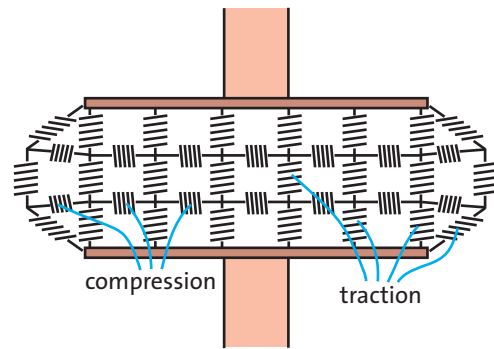


Fig. 1.67 Modèle du champ électrique entre deux plaques parallèles. Les ressorts, qui sont orientés dans la direction des lignes de champ électrique, subissent une contrainte de traction. Les ressorts qui sont parallèles aux surfaces du champ sont soumis à une contrainte de compression.

périeure sur sa face inférieure. Comme il y a une contrainte de traction dans la direction des lignes de champ et que les lignes de champ commencent sur la plaque, le champ tire la plaque vers le bas. De la même façon, la plaque inférieure est tirée vers le haut.

Une question reste ouverte : perpendiculairement aux lignes de champ, c'est-à-dire dans la direction des surfaces de champ, il existe une contrainte de compression. Si le champ exerce une pression vers l'extérieur dans le plan horizontal, sur quoi va-t-il s'appuyer ? Où le champ repose-t-il sur les côtés ? On peut le voir en considérant le modèle de champ de la Fig. 1.67. Ici, le champ est remplacé par de nombreux petits ressorts. Certains d'entre eux sont orientés parallèlement aux lignes du champ. Ils sont soumis à une contrainte de traction. Les autres sont parallèles aux surfaces du champ. Ils sont soumis à une contrainte de compression.

Quelle est maintenant la réponse à notre question ? Où les ressorts horizontaux sont-ils fixés sur les côtés ? Sur les ressorts qui se trouvent à l'extrême gauche et à l'extrême droite sur une vue de côté ; ceux-ci, à leur tour, adhèrent aux plaques de sorte que celles-ci sont exposées à une contrainte de traction dans leur direction longitudinale. Cela implique pour le champ que la pression à l'intérieur de celui-ci agit de telle manière que le champ tire les plaques dans le sens longitudinal. En résumé :

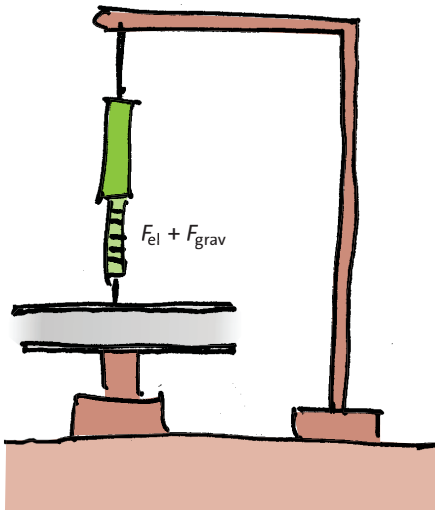
Le champ entre deux plaques de charges opposées

- attire les plaques l'une vers l'autre ;
- tire chaque plaque dans une direction longitudinale.

Nous avons donc trouvé une nouvelle méthode pour mesurer l'intensité du champ entre les plaques, Fig. 1.68 : nous mesurons le courant de quantité de mouvement qui s'écoule à travers le champ, de la plaque supérieure à la plaque inférieure (dans la direction  $z$  négative). Ce courant de quantité de mouvement vient d'en haut, circule dans le champ à travers l'instrument de mesure et la plaque supérieure et quitte le champ au niveau de la plaque inférieure (et puis il s'écoule à travers la table et les montants fixes pour revenir en haut, de sorte que le circuit est fermé).

Nous savons que

$$F_{el} = \sigma_{par} \cdot A.$$



**Fig. 1.68** Le compteur de courant de quantité de mouvement indique la somme  $F_{el} + F_{grav}$  du courant de quantité de mouvement, qui arrive dans la plaque supérieure par le champ électrique, et celui qui arrive par le champ gravitationnel.

Avec

$$\sigma_{||} = -\frac{\epsilon_0}{2} |\vec{E}|^2$$

nous obtenons

$$F_{el} = -\frac{\epsilon_0}{2} |\vec{E}|^2 \cdot A$$

et de ce fait

$$|\vec{E}| = \sqrt{\frac{-2F_{el}}{\epsilon_0 \cdot A}}.$$

L'instrument de mesure indique la somme  $F_{el} + F_{grav}$ , c'est-à-dire le courant de quantité de mouvement qui s'écoule dans le sol à travers le champ gravitationnel et qui correspond au poids de la plaque supérieure du condensateur, en plus du courant de quantité de mouvement qui circule à travers le champ électrique. Pour obtenir  $F_{el}$ ,  $F_{grav}$  doit être soustrait de la valeur mesurée.

Étant donné que dans les champs électriques habituels, les courants de quantité de mouvement sont très faibles, l'instrument de mesure des courants de quantité de mouvement doit être très sensible.

### Exemple

Nous supposons avoir mesuré

$$F_{el} = -0,05 \text{ N}.$$

Si la surface de la plaque est

$$A = 500 \text{ cm}^2$$

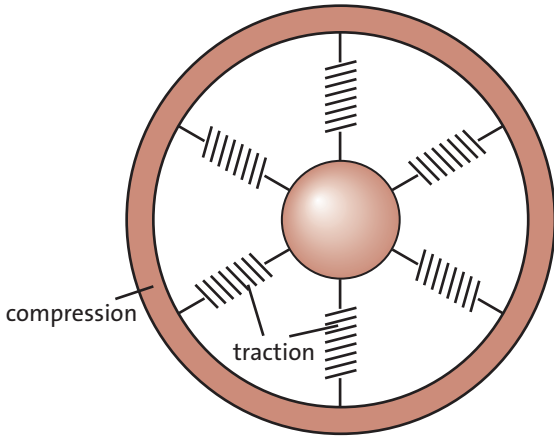
nous obtenons l'intensité du champ électrique

$$\begin{aligned} |\vec{E}| &= \sqrt{\frac{-2F_{el}}{\epsilon_0 \cdot A}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot 0,05 \text{ N}}{8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}/(\text{V} \cdot \text{m}) \cdot 0,05 \text{ m}^2}} \\ &= 4,8 \cdot 10^5 \text{ V/m} \end{aligned}$$

Si nous connaissons l'intensité du champ électrique à partir d'une autre source (nous apprendrons bientôt une méthode plus pratique pour la mesurer), l'expérience peut également être utilisée pour déterminer la constante électrique  $\epsilon_0$ .

### 2. Un corps sphérique

Nous supposons que la charge est située à la surface d'une sphère. Vous savez à quoi ressemble l'image du champ. Comme les lignes de champ s'étendent radia-



**Fig. 1.69** Modèle du champ électrique d'une sphère chargée. Les ressorts tirent la surface de la sphère vers l'extérieur. Il y a une contrainte de compression dans l'anneau auquel les ressorts sont attachés.

lement vers l'extérieur, le champ tire vers l'extérieur sur la surface de la sphère — avec la même force dans toutes les directions. Il est préférable de considérer la sphère comme un globe creux et élastique, par exemple comme un ballon ou une bulle de savon. Un tel globe augmentera de taille lorsqu'une charge électrique y sera appliquée.

Ici aussi, nous nous demandons sur quoi se tient le champ électrique à l'extérieur. Cette fois, la réponse est : sur lui-même. La Fig. 1.69 montre à nouveau un modèle matériel. Il se compose de ressorts radiaux et d'un anneau. Cette structure tire également sur le corps central dans toutes les directions. Les extrémités extérieures des ressorts sont attachées à l'anneau. Par conséquent, des contraintes de compression se développent dans l'anneau dans la direction tangentielle, c'est-à-dire perpendiculairement à la direction des ressorts. Dans le champ électrique, la contrainte est en

effet similaire, puisqu'il existe une contrainte de compression perpendiculaire aux lignes de champ.

Le champ d'une sphère chargée tire sur la surface vers l'extérieur.

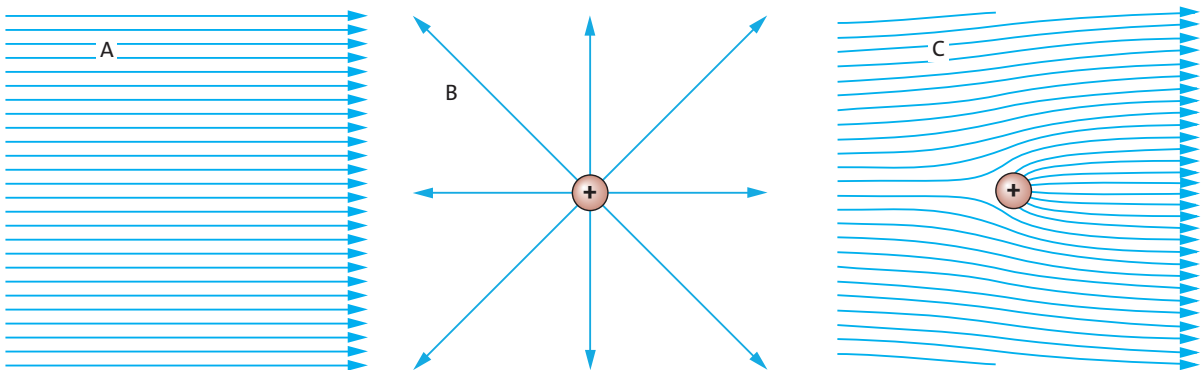
### 3. Le « corps d'essai » chargé électriquement

Si un corps porteur d'une charge électrique  $Q$  est amené en un point quelconque d'un champ électrique d'intensité  $\vec{E}$ , un courant de quantité de mouvement circule dans le corps dont l'intensité  $\vec{F}$  est calculée selon la formule suivante :

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}.$$

La mesure de l'intensité du courant de quantité de mouvement et de la charge électrique nous permet de déterminer l'intensité du champ électrique.

Nous pouvons maintenant comprendre l'origine de ce courant de quantité de mouvement. La Fig. 1.70 montre à gauche une vue en coupe du champ original A sans aucun corps supplémentaire. L'image du milieu montre le corps avec son champ B. Si le corps est ensuite amené dans le champ A, un nouveau champ C, à droite, en résulte. Nous obtenons C en combinant les vecteurs intensité de champ de A et de B point par point selon les règles de l'addition vectorielle. (Cette opération peut bien sûr être effectuée avec un ordinateur.) Vous voyez : sur le côté droit du corps, l'intensité du champ a augmenté par rapport à B ; sur le côté gauche, elle a diminué. À droite, le champ tire plus qu'à gauche, c'est-à-dire qu'au total, le champ tire le corps vers la droite. En d'autres termes, un courant de quantité de mouvement net circule dans le corps. C'est exactement le courant de quantité de mouvement que nous pouvons calculer selon l'équation mentionnée ci-dessus.



**Fig. 1.70** Les intensités des champs A et B sont additionnées. Le champ C qui en résulte tire davantage sur le côté droit que sur le côté gauche. Un courant de quantité de mouvement net circule dans le corps.



Exercices

1. Comme nous le savons, les corps chargés d'un dipôle sont tirés l'un vers l'autre par le champ. Comment peut-on voir cela sur l'image du champ de la Fig. 1.54 ?
2. Deux sphères également chargées sont écartées par le champ. Comment peut-on lire cela sur l'image du champ de la Fig. 1.55 ?
3. Il existe un champ électrique homogène entre deux plaques parallèles de charges égales mais opposées (surface de chaque plaque :  $2400 \text{ cm}^2$ ). Le champ attire les plaques l'une vers l'autre. Le courant de quantité de mouvement correspondant est mesuré et nous trouvons  $0,0025 \text{ N}$ . Quelle est l'intensité du champ électrique entre les plaques ?
4. La Fig. 1.71 montre deux sphères concentriques. La sphère intérieure est chargée négativement. La sphère extérieure porte une charge positive de la même quantité que la sphère intérieure. Le champ est uniquement situé dans l'espace entre les deux sphères. Dessinez les lignes et les surfaces du champ.

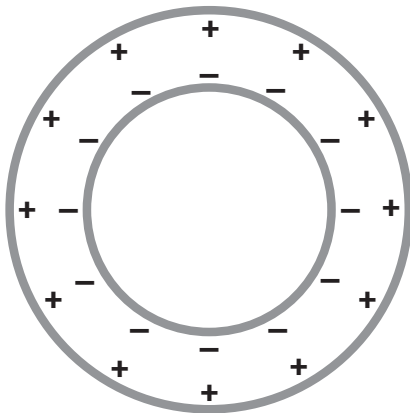


Fig. 1.71 Pour l'exercice 4

## 1.20 Condensateur et capacité

Les condensateurs sont utilisés pour stocker de la charge électrique et pour stocker de l'énergie. Un condensateur est constitué de deux fines plaques ou couches métalliques séparées par une très faible distance et isolées électriquement l'une de l'autre. La charge stockée se trouve sur les plaques, l'énergie dans le champ entre les plaques. Le champ d'un condensateur est le même que celui de la Fig. 1.57. Pendant le processus de charge du condensateur, la charge électrique est « pompée » d'une plaque sur l'autre. Une plaque porte alors autant de charge négative que l'autre porte de charge positive. Le condensateur est donc globalement neutre. Le symbole technique d'un condensateur est constitué de deux courtes lignes parallèles épaisses, comme le montrent les figures suivantes.

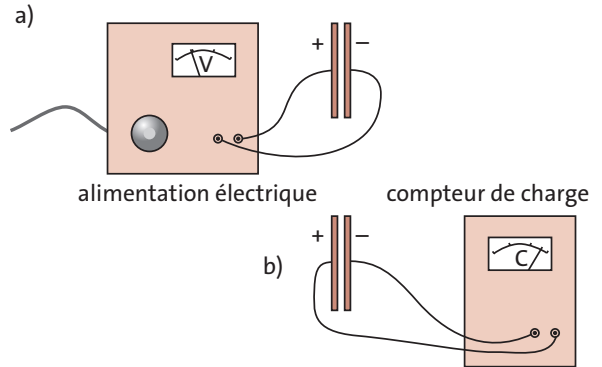


Fig. 1.72 (a) Charge du condensateur : l'alimentation électrique « pompe » la charge électrique d'une plaque sur l'autre. (b) Le condensateur est déchargé à travers le compteur.

Tant qu'un condensateur est chargé, il existe une différence de potentiel électrique entre ses plaques. Plus la charge  $Q$  est importante, plus la différence de potentiel  $U$  est élevée. Nous souhaitons analyser la relation entre  $Q$  et  $U$ . Nous chargeons un condensateur au moyen d'une alimentation électrique, Fig. 1.72a. Le processus de charge est très rapide. Les bornes de l'alimentation doivent être mises en contact bref avec les lignes d'alimentation du condensateur. La tension entre les plaques du condensateur est maintenant égale à la tension de l'alimentation. Ensuite, nous mesurons  $Q$  en déchargeant le condensateur à l'aide d'un compteur de charge, Fig. 1.72b. La charge de la plaque positive passe à la plaque négative à travers le compteur jusqu'à ce que les deux plaques soient déchargées.

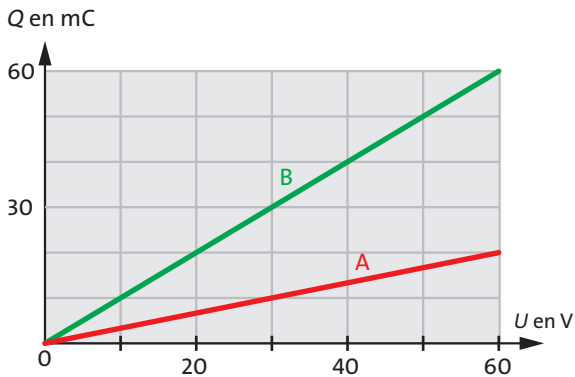
Nous répétons le processus « charge-mesure » avec d'autres tensions et obtenons ainsi une valeur de charge pour chaque tension testée. Avec ces valeurs, nous traçons un diagramme  $Q-U$  et constatons que la charge est proportionnelle à la tension :

$$Q \sim U.$$

Cette affirmation revient à dire que le quotient  $Q/U$  est constant. Ce quotient est appelé la capacité  $C$  du condensateur :

$$C = \frac{Q}{U}$$

Si la capacité d'un condensateur B est trois fois plus élevée que celle d'un autre condensateur A, il y aura trois fois plus de charge sur B que sur A pour une tension donnée, Fig. 1.73.



**Fig. 1.73** La tension entre les plaques d'un condensateur est proportionnelle à la charge qui se trouve sur les plaques. La capacité du condensateur B est trois fois supérieure à celle de A.

N'oubliez pas que  $Q$  n'est pas la charge totale du condensateur ; la charge totale est toujours nulle.  $Q$  est la charge de la plaque chargée positivement ;  $U$  est la différence « haut potentiel moins bas potentiel ».

La valeur de la capacité est imprimée sur les condensateurs techniques. De la dernière équation, nous pouvons conclure que l'unité de mesure est le coulomb/volt. Cette unité est abrégée en farad (F). Par conséquent, nous avons

$$1 \text{ C/V} = 1 \text{ F.}$$

Un farad est une très grande unité. La capacité des condensateurs techniques est souvent de l'ordre du nanofarad au millifarad.

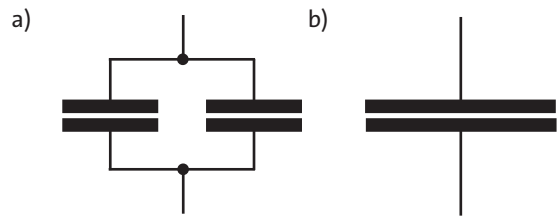
La charge électrique  $Q$  qui se trouve sur l'une des plaques d'un condensateur est proportionnelle à la tension  $U$  entre les plaques.

$$Q = C \cdot U$$

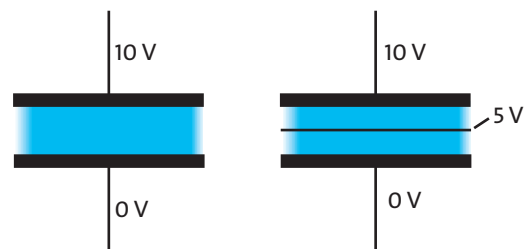
$C$  est la capacité du condensateur.

De quoi dépend la capacité du condensateur ? Comment un condensateur doit-il être conçu pour avoir une capacité élevée ? Il n'est pas difficile de répondre à ces questions. Nous commençons notre raisonnement à partir d'un condensateur donné que nous essayons d'améliorer, c'est-à-dire dont nous essayons d'augmenter la capacité.

Comment pouvons-nous modifier un condensateur pour qu'il transporte plus de charge à la même tension ? Tout d'abord, nous augmentons la surface



**Fig. 1.74** (a) Deux condensateurs connectés en parallèle stockent deux fois plus de charge électrique qu'un seul condensateur (à tension égale). (b) Un condensateur avec une surface de plaque double stocke deux fois plus de charge électrique qu'un condensateur avec la surface de plaque initiale.



**Fig. 1.75** Un condensateur est décomposé en deux condensateurs avec la moitié de la distance entre les plaques. Sur chacun de ces condensateurs partiels, il n'y a que la moitié de la tension totale.

des plaques. Pour comprendre que cela doit conduire à une augmentation de la capacité, nous insérons une étape intermédiaire. Il est logique que deux condensateurs « connectés en parallèle », Fig. 1.74a, puissent stocker deux fois plus de charge qu'un seul. Mais nous pouvons aussi considérer les deux condensateurs parallèles comme un seul condensateur avec une surface de plaque double, Fig. 1.74b.

Avec un raisonnement similaire, nous obtenons la dépendance de la capacité à la distance entre les plaques. Nous pouvons décomposer dans notre esprit le condensateur de la Fig. 1.75 en deux condensateurs qui sont « connectés en série ». La tension sur chacun d'eux n'est que la moitié de la tension totale, mais chacun d'eux stocke la même charge que le condensateur entier à gauche de la figure. Nous pouvons en conclure que le condensateur dont la distance entre les plaques est réduite de moitié a une capacité deux fois supérieure à celle du condensateur de gauche.

Nous résumons les deux résultats :

La capacité d'un condensateur est proportionnelle à la surface de la plaque  $A$  et inversement proportionnelle à la distance  $d$  entre les plaques



$$C \sim \frac{A}{d}$$

Pour obtenir une équation, nous devons introduire un facteur de proportionnalité :

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

$A$  = surface d'une plaque

$d$  = distance entre les plaques

$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}/(\text{V} \cdot \text{m})$  = constante électrique

La valeur de la constante électrique est obtenue par la mesure.

### Exercices

1. Un condensateur est chargé pendant dix millisecondes avec  $20 \mu\text{A}$ . Il atteint ainsi une tension de  $60 \text{ V}$ . Quelle est sa capacité ?
2. Un condensateur de  $16 \mu\text{F}$  est chargé jusqu'à ce que sa tension s'élève à  $10 \text{ V}$ . Quelle charge se trouve alors sur ses plaques ?
3. Quelle distance entre les plaques un condensateur dont la surface des plaques est de  $0,5 \text{ m}^2$  doit-il avoir pour que sa capacité soit de  $1 \mu\text{F}$  ?
4. Deux condensateurs de  $8 \mu\text{F}$  chacun sont connectés en parallèle. Quelle est la capacité globale ? Formulez une règle.
5. Deux condensateurs de  $8 \mu\text{F}$  chacun sont connectés en série. Quelle est la capacité totale ? Formulez une règle.

## 1.21 Surfaces à potentiel constant

Chaque point d'un circuit électrique est à un potentiel électrique bien défini. Si nous allons d'un point qui est au potentiel  $\varphi_1$  à un point dont le potentiel est  $\varphi_2$ , nous passons par toutes les valeurs intermédiaires. Nous partons, par exemple, du point  $P_1$  de la Fig. 1.76 et nous nous déplaçons à travers les deux résistances jusqu'à  $P_2$ . Le potentiel en  $P_1$  est de  $0 \text{ V}$ , celui de  $P_2$  de  $10 \text{ V}$ . Nous passons en un point où le potentiel est de  $5 \text{ V}$ , c'est-à-dire exactement entre les deux résistances. Mais il existe également un endroit où le potentiel est de  $1 \text{ V}$  et un autre où il est de  $2 \text{ V}$  ou  $2,5 \text{ V}$  ou  $2,6 \text{ V}$  ou  $7,344 \text{ V}$ , etc. Par conséquent, l'endroit où le potentiel est de  $2,5 \text{ V}$  est situé quelque part à l'intérieur de la résistance du bas.

Le fait que nous trouvions toutes les valeurs intermédiaires du potentiel sur le chemin de  $P_1$  à  $P_2$  ne s'applique pas seulement à un chemin à l'intérieur du circuit électrique. Ainsi, chaque point extérieur a un potentiel bien défini et, lorsque nous nous déplaçons

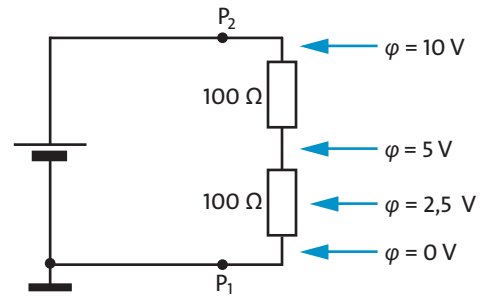


Fig. 1.76 Si nous nous déplaçons de  $P_1$  ( $0 \text{ V}$ ) à  $P_2$  ( $10 \text{ V}$ ), nous passons par toutes les valeurs de potentiel entre  $0$  et  $10 \text{ V}$ .

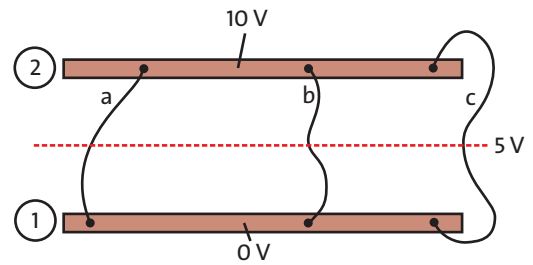


Fig. 1.77 Quelle que soit la façon dont nous nous déplaçons de la plaque 1 à la plaque 2 : nous passons par un point où le potentiel est de  $5 \text{ V}$ .

à l'extérieur du circuit électrique de  $P_1$  à  $P_2$ , nous passons par toutes les valeurs de potentiel entre  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$ .

La meilleure façon de comprendre ceci est d'utiliser un exemple simple. Considérons une fois de plus un condensateur (Fig. 1.77).

Supposons que la plaque 1 (en bas) est à un potentiel  $\varphi_1 = 0 \text{ V}$ , la plaque 2 (en haut) à  $\varphi_2 = 10 \text{ V}$ . Si nous nous déplaçons de la plaque 1 à la plaque 2, nous passons nécessairement par toutes les valeurs entre  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$ . Ainsi, si nous choisissons le chemin a, nous arriverons quelque part à un point dont le potentiel est de  $5 \text{ V}$ . Mais si nous choisissons aussi le chemin b ou c, nous passerons par un point dont le potentiel est de  $5 \text{ V}$ . Par conséquent, il doit y avoir une ligne entre les deux plaques de notre figure sur laquelle se trouvent tous les points avec  $\varphi = 6 \text{ V}$  et une autre avec tous les points avec  $\varphi = 2 \text{ V}$ , etc.

C'est un peu comme lorsque nous escaladons une montagne de  $200 \text{ m}$  de haut. Quel que soit le chemin que nous choisissons, nous atteindrons à un moment donné une altitude de  $100 \text{ m}$ . Sur une carte, il existe une ligne qui relie tous les endroits de l'altitude  $100 \text{ m}$  les uns aux autres — c'est une courbe de niveau.

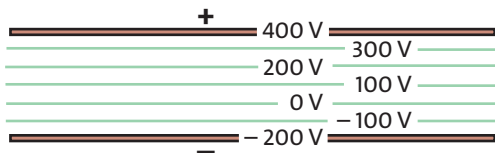
La Fig. 1.77 montre seulement une coupe transversale bidimensionnelle à travers les plaques. Dans

l'espace tridimensionnel, les points à 5 V ne sont pas situés sur une ligne mais sur une surface, tout comme les points à 6 V, les points à 2 V, etc. En d'autres termes, il existe des surfaces entre les plaques sur lesquelles le potentiel a une valeur uniforme. Chaque point du champ a un potentiel électrique bien défini et est situé sur l'une de ces surfaces.

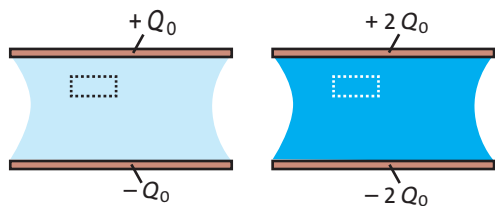
Nous savons que chaque point d'un champ est situé sur une surface de champ. Avec la surface de potentiel constant, nous sommes revenus à un concept que nous connaissons déjà car elles sont identiques aux surfaces de champ.

Sur une surface de champ, le potentiel électrique a une valeur constante.

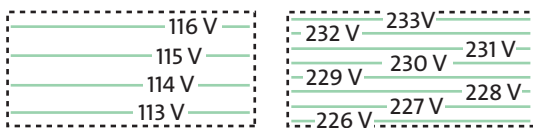
La Fig. 1.78 montre un condensateur. Le potentiel de la plaque inférieure est de  $-200$  V, celui de la plaque supérieure est de  $+400$  V. Les surfaces de champ correspondant à des multiples entiers de cent volts sont également représentées.



**Fig. 1.78** Les surfaces de champ dont les potentiels différent les uns des autres de 100 V sont indiquées. Comme le champ est homogène, ces surfaces sont toutes à la même distance les unes des autres.



**Fig. 1.79** Il y a deux fois plus de charges sur les plaques du condensateur de droite que sur celles de gauche. La tension et l'intensité du champ à droite sont également deux fois plus élevées qu'à gauche.



**Fig. 1.80** Sections des champs des condensateurs de la Fig. 1.79. La densité des surfaces de champ dans l'image de droite est deux fois plus importante que dans l'image de gauche.

Comme le champ est homogène à l'intérieur du condensateur, elles sont toutes à la même distance les unes des autres. Par conséquent, à partir d'une telle image, on peut lire l'intensité du champ. Pour voir comment cela fonctionne, nous comparons deux champs homogènes. La Fig. 1.79 montre deux condensateurs qui ont la même structure : même distance entre les plaques, même surface. Mais ils sont chargés différemment : il y a deux fois plus de charges électriques sur les plaques du condensateur de droite que sur celles du condensateur de gauche. Par conséquent, la tension entre les plaques est également deux fois plus élevée pour le condensateur de droite (pourquoi ?), et par conséquent il en est de même pour l'intensité du champ (pourquoi ?).

Nous examinons maintenant une petite section de chacun des deux condensateurs — indiquées par des lignes pointillées sur la figure — dans une vue agrandie, Fig. 1.80. Les surfaces de champ sont illustrées par pas de 1 V.

Maintenant, voici le problème que nous allons analyser : comment peut-on lire l'intensité du champ à partir des images de la surface de champ de la Fig. 1.80 ?

La question comporte deux parties :

- Comment peut-on voir la direction de  $\vec{E}$  sur les images ?
- Comment peut-on lire la norme de  $\vec{E}$  sur les images ?

La première question a déjà reçu une réponse : le vecteur d'intensité de champ est perpendiculaire aux surfaces de champ.

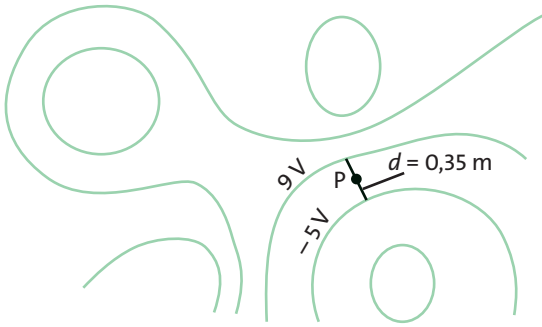
La question concernant la norme est plus intéressante. En fait, la norme peut également être lue à partir des images. Plus la distance entre les surfaces de champ est faible, plus l'intensité du champ est élevée. Nous choisissons deux surfaces de champ quelconques. Elles correspondent à une différence de potentiel bien définie  $\Delta\phi$  et elles ont une distance bien définie  $d$ .

Le quotient  $\Delta\phi/d$  est une mesure de la densité des surfaces de champ. Sa valeur est égale à la norme de l'intensité du champ électrique :

$$|\vec{E}| = \frac{\Delta\phi}{d}$$

Comment lire l'intensité du champ électrique à partir d'une image de surface de champ :

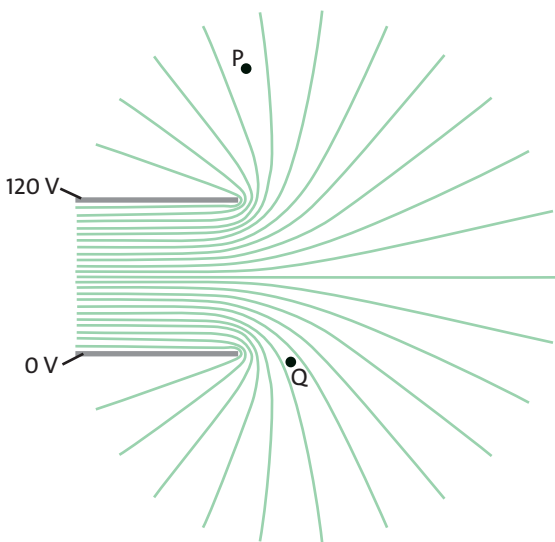
direction de  $\vec{E}$  : perpendiculaire aux surfaces de champ  
norme de  $\vec{E}$  : quotient de la différence de potentiel et de la distance de deux surfaces de champ



**Fig. 1.81** Trouver l'intensité du champ au point P d'un champ inhomogène : on choisit deux surfaces de champ adjacentes et on divise la différence de potentiel correspondante (ici 14 V) par la distance (ici 0,35 m, la figure n'est pas à l'échelle 1).

Comme unité de mesure de l'intensité du champ, nous obtenons V/m à partir de l'équation précédente, c'est-à-dire l'unité que nous avons déjà utilisée précédemment.

Nous avons établi notre équation à l'aide du champ homogène d'un condensateur. La formule est importante car elle est également valable pour tout autre champ, c'est-à-dire également pour les champs non homogènes. Dans un champ non homogène comme celui de la Fig. 1.81, l'intensité du champ change d'un point à l'autre. Pour déterminer l'intensité du champ en un point quelconque P, nous examinons deux surfaces de champ qui sont proches de P. Ici aussi, la norme de l'intensité du champ peut être obtenu comme un quo-



**Fig. 1.82** Pour l'exercice 2

tient de la différence de potentiel des deux surfaces de champ et de leur distance.

Dans un champ homogène, l'intensité du champ est la même partout. Par conséquent, l'intensité du champ peut également être déterminée en utilisant des surfaces de champ éloignées les unes des autres. Dans le cas d'un condensateur, nous pouvons simplement utiliser les plaques elles-mêmes. Par conséquent, l'intensité du champ dans le condensateur est obtenue en divisant la tension  $U$  entre les plaques par la distance  $d$  entre les plaques.

Intensité du champ électrique dans un condensateur :

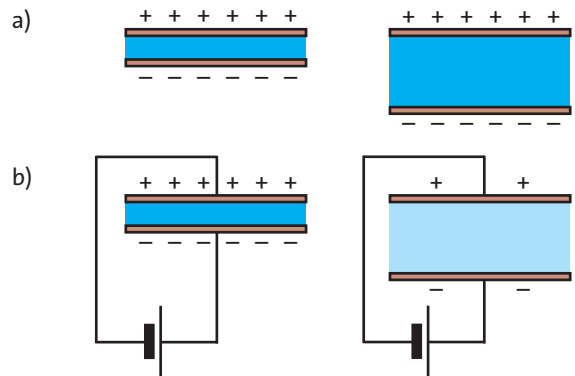
$$|\vec{E}| = \frac{U}{d} \quad (1.3)$$

### Exercices

1. Une tension de 2000 V est appliquée à un condensateur dont la distance entre les plaques est  $d = 0,5$  cm. Quelle est l'intensité du champ électrique entre les plaques ?
2. Quelle est la valeur de l'intensité du champ aux points P et Q du champ du condensateur de la Fig. 1.82 ? (L'échelle est de 10 à 1, c'est-à-dire que l'image est 10 fois plus grande que le condensateur réel).

## 1.22 En savoir plus sur le condensateur

Nous augmentons la distance entre les plaques d'un condensateur de sa valeur initiale  $d$  à  $d' = 3d$  et nous nous demandons ce qui va se passer pour la capacité, la charge, la tension et l'intensité du champ électrique, Fig. 1.83.



**Fig. 1.83** Les plaques d'un condensateur sont écartées, (a) à charge constante, (b) à tension constante.

Tout d'abord, examinons la capacité. En raison de

$$C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

la capacité va diminuer de la valeur initiale  $C$  à  $C' = C/3$ .

En ce qui concerne la charge et la tension, il faut distinguer deux possibilités de réaliser le processus : on maintient soit la charge constante, soit la tension constante, tout en changeant  $d$ .

### 1. Charge constante, $Q' = Q$ , Fig. 1.83a.

Nous nous assurons qu'aucune charge ne peut circuler vers ou depuis les plaques pendant qu'elles sont écartées. Avec  $Q = C \cdot U$ , nous obtenons  $U' = 3U$ . Avec l'équation (1.3), nous avons

$$|\vec{E}'| = |\vec{E}|$$

Si les plaques d'un condensateur chargé sont écartées, la tension augmente et l'intensité du champ reste constante.

### 2. Tension constante, $U' = U$ , Fig. 1.83b.

Le condensateur reste connecté à l'alimentation électrique lorsque les plaques sont écartées.

Avec  $Q = C \cdot U$  on obtient  $Q' = Q/3$  et avec l'équation (1.3) on obtient

$$|\vec{E}'| = |\vec{E}|/3.$$

Si les plaques sont écartées à une tension constante, la charge et l'intensité du champ diminuent.

L'une de nos découvertes est particulièrement intéressante :

Dans le cas d'une charge constante, l'intensité du champ dans le condensateur est indépendante de la distance entre les plaques.

Ce résultat peut également être exprimé de la manière suivante : si la distance entre les plaques est augmentée alors que  $Q$  reste constant, la quantité de substance de champ augmente alors que sa densité reste égale.

### Exercice

- Examinez comment la capacité, la charge, la tension et l'intensité du champ changent si la surface des plaques du condensateur est multipliée par trois (alors que la distance entre les plaques reste constante). Faites la distinction entre les cas  $Q = \text{constant}$  et  $U = \text{constant}$ .

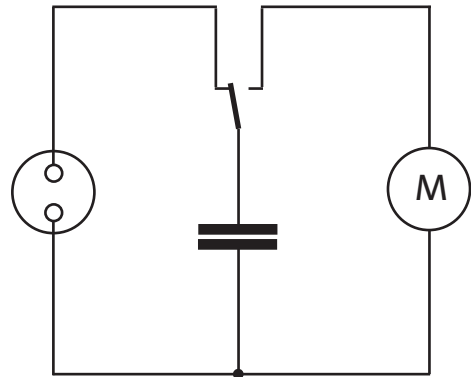


Fig. 1.84 Le condensateur comme dispositif de stockage d'énergie

## 1.23 L'énergie du champ électrique

Nous chargeons le condensateur de la Fig. 1.84 en le connectant brièvement à une alimentation de 6 V. Ensuite, nous le connectons à un petit moteur électrique. Le moteur tourne pendant quelques secondes.

Cette expérience nous permet de voir comment un condensateur peut être utilisé : comme un dispositif de stockage d'énergie. Pendant que les plaques sont chargées en électricité, entre celles-ci se crée un champ électrique qui contient de l'énergie tout comme un champ magnétique. Pendant le processus de charge, l'énergie s'écoule de l'alimentation électrique vers le condensateur. Lors de la décharge, le condensateur libère l'énergie vers le moteur.

Par conséquent, le condensateur peut avoir une fonction similaire à celle d'une batterie (accumulateur), car la batterie est également un dispositif de stockage d'énergie. Tout comme la batterie, le condensateur reçoit de l'énergie pendant la charge, avec l'électricité comme porteur d'énergie, et la libère pendant la décharge avec le même porteur d'énergie. Cependant, il se distingue de la batterie par deux caractéristiques : d'une part, l'énergie peut être introduite dans le condensateur et en être retirée beaucoup plus rapidement que dans la batterie. D'autre part, la capacité de stockage d'un condensateur (pour l'énergie) est beaucoup plus faible que celle d'une batterie de même taille. Certaines montres alimentées en énergie par des cellules photovoltaïques sont équipées d'un condensateur qui sert à stocker l'énergie pendant les périodes où la montre n'est pas exposée à la lumière.

Dans ce qui suit, nous allons calculer l'énergie que contient un champ électrique.

## L'énergie du champ électrique

Nous chargeons un condensateur de capacité  $C$  en laissant circuler un courant électrique constant  $I$  pendant une période de temps bien définie : de l'instant  $t = 0$  à  $t = t_0$ . Ainsi, la charge sur les plaques du condensateur augmente linéairement avec le temps :

$$Q = I \cdot t.$$

A la fin, c'est-à-dire au temps  $t_0$ , la charge électrique est de  $Q_0 = I \cdot t_0$  sur chacune des deux plaques. De plus, un courant d'énergie

$$P = U \cdot I$$

s'écoule dans le condensateur pendant le processus de charge. Alors que le courant électrique  $I$  reste constant, la tension  $U$  augmente pendant le processus de charge

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{I \cdot t}{C}$$

On obtient donc pour le courant d'énergie

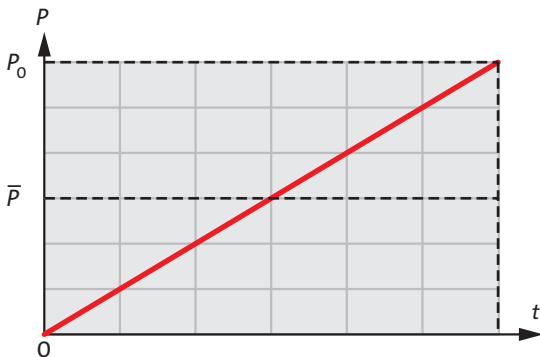
$$P = \frac{1}{C} \cdot I^2 \cdot t.$$

De même, le courant d'énergie  $P$  augmente linéairement avec le temps, Fig. 1.85.

Cependant, ce que nous recherchons n'est pas le courant d'énergie  $P$ , mais l'énergie  $E_0$  à la fin du processus de charge, c'est-à-dire au temps  $t_0$ . Si le courant d'énergie était constant en fonction du temps, nous aurions la relation suivante

$$E = P \cdot t,$$

entre le courant d'énergie  $P$  et l'énergie  $E$ . Ainsi, nous aurions également



**Fig. 1.85** Pendant le processus de charge du condensateur avec un courant électrique constant, le courant d'énergie augmente linéairement avec le temps.

$$E_0 = P \cdot t_0.$$

Puisque dans la réalité  $P$  n'est pas constant dans le temps, nous devons utiliser la moyenne temporelle  $\bar{P}$  de  $P$  pour calculer  $E_0$ .

$$E_0 = \bar{P} \cdot t_0.$$

Comme nous pouvons le lire sur la Fig. 1.85, la valeur moyenne de  $P$  est de

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{C} \cdot I^2 \cdot t_0.$$

Nous obtenons ainsi l'énergie à la fin du processus de charge :

$$E_0 = \bar{P} \cdot t_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{C} \cdot I^2 \cdot t_0^2.$$

Nous insérons  $Q_0 = I \cdot t_0$  :

$$E_0 = \frac{Q_0^2}{2C}.$$

Nous avons eu besoin de l'indice 0 uniquement pour distinguer la variable de la valeur finale. Nous pouvons maintenant le supprimer puisque l'équation est valable pour tout  $Q$ . Nous avons donc l'équation suivante :

$$E = \frac{Q^2}{2C}.$$

Remarquez que cette équation a une structure similaire à :

$$E = \frac{p^2}{2m}.$$

En utilisant  $Q = C \cdot U$  nous pouvons aussi écrire :

$$E = \frac{C}{2} U^2. \quad (1.4)$$

C'est l'énergie totale contenue dans le champ. Nous pouvons également calculer la densité d'énergie du champ  $\rho_E$ , c'est-à-dire l'énergie divisée par le volume :

$$\rho_E = \frac{E}{V}.$$

Dans l'équation 1.4, nous insérons

$$U = |\vec{E}| \cdot d \text{ et } C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

et nous obtenons

$$E = \frac{\epsilon_0}{2} \cdot \frac{A}{d} \cdot (|\vec{E}| \cdot d)^2 = \frac{\epsilon_0}{2} \cdot |\vec{E}|^2 \cdot V.$$

Dans la dernière étape, nous avons remplacé le volume  $V$  par  $A \cdot d$ . La densité d'énergie devient maintenant

$$\rho_E = \frac{\epsilon_0}{2} \cdot |\vec{E}|^2.$$

Cette équation n'est pas uniquement valable pour le champ d'un condensateur mais aussi pour tout autre champ électrique.

L'énergie dans le champ d'un condensateur peut être calculée à partir de la capacité et de la tension :

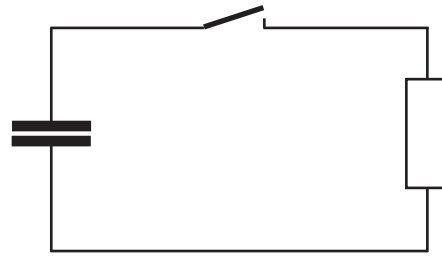
$$E = \frac{C}{2} U^2.$$

La densité d'énergie d'un champ électrique peut être calculée à partir de l'intensité du champ :

$$\rho_E = \frac{\epsilon_0}{2} \cdot |\vec{E}|^2.$$

### Exercices

- Un condensateur de capacité  $16 \mu\text{F}$  est chargé pendant 8 s avec un courant électrique de 10 mA. (a) Quelle charge se trouvera sur ses plaques à la fin du processus de charge ? (b) Quelle quantité d'énergie est contenue dans le champ ?
- Un condensateur de  $80 \mu\text{F}$  est connecté à une alimentation électrique de 300 volts. Quelle quantité d'énergie passera dans le champ du condensateur au cours du processus ? La distance entre les plaques est de  $8 \mu\text{m}$ . Quelle est la densité d'énergie dans le champ du condensateur ?
- Une énergie de 1,6 joule est nécessaire pour charger un condensateur à une tension de 10 000 V. (a) Quelle est la capacité du condensateur ? (b) Quelle charge se trouve sur les plaques du condensateur ?
- Les plaques cylindriques d'un « condensateur cylindrique » ont des rayons de 24 mm et 25 mm. La longueur du cylindre est de 120 mm. Le condensateur a été chargé à 2000 V. (a) Calculez la capacité du condensateur. (b) Quelle est la charge du condensateur ? (c) Quelle est la quantité d'énergie contenue dans le champ du condensateur ? (d) Quelle est la densité d'énergie ?
- Comment l'énergie dans le champ du condensateur des Fig. 1.83a et Fig. 1.83b changera-t-elle si la distance entre les plaques est augmentée ? Examinez comment l'énergie changera si la surface du condensateur est multipliée par trois (tout en laissant la distance entre les plaques constante). Faites également la distinction entre les cas  $Q = \text{constante}$  et  $U = \text{constante}$ .
- Les bornes d'un condensateur chargé A sont connectées à celles d'un condensateur non chargé B. A et B ont la même capacité. Que se passe-t-il ? Quelles sont les valeurs individuelles de la charge électrique, de la tension, de l'intensité du champ et de l'énergie pour A et B ? Remarquez-vous quelque chose ? Essayez d'expliquer. Nous avons rencontré un phénomène similaire en mécanique (tome « Mécanique », section 5.4, exercices 3 et 8).



**Fig. 1.86** Lorsque l'interrupteur est fermé, le condensateur se décharge à travers la résistance. À quoi ressemble la fonction  $Q(t)$  ?

## 1.24 Courbe de décharge du condensateur

Nous imaginons que le condensateur de la Fig. 1.86 est chargé. (Le circuit de charge n'est pas illustré.) Si l'interrupteur est fermé, il se décharge à travers la résistance.

Nous nous intéressons au processus de décharge : à quelle vitesse le condensateur se décharge-t-il ? Quelle est la variation  $Q(t)$  de la charge du condensateur en fonction du temps ?

Pour répondre à ces questions, nous avons besoin d'une méthode mathématique que nous n'avons pas encore vue. Nous devons résoudre une équation différentielle.

C'est toujours une bonne idée de penser à ce à quoi la solution pourrait ressembler avant de commencer à calculer. Dans notre cas, cela signifie : qu'attendons-nous de  $Q(t)$  ?

Après avoir fermé l'interrupteur, un courant électrique circule dans la résistance. Au début, la tension est encore élevée, et le courant l'est également, car

$$I = \frac{U}{R}.$$

La charge du condensateur diminue car le courant électrique circule. En raison de

$$U = \frac{Q}{C}$$

la tension diminue également. Par conséquent, cela conduit également à une diminution du courant. Lorsque le courant diminue, la charge diminue plus lentement qu'avant, etc. etc. On le voit : moins il reste de charge sur le condensateur, plus le processus de décharge est lent.

Avant de poursuivre notre analyse et nos calculs, nous souhaitons faire une observation plus générale. Il



existe de nombreux processus comme celui que nous venons de mentionner. Pour l'instant, nous aimerions souligner la particularité de ces processus : plus il y a de « quelque chose », plus la quantité de ce « quelque chose » change rapidement.

Voici deux exemples :

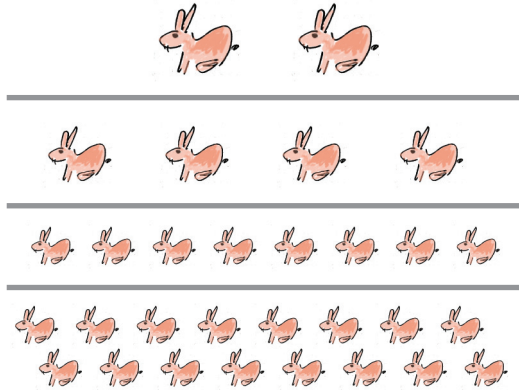


Fig. 1.87 Quatre générations de lapins : plus leur nombre est élevé, plus leur population augmente rapidement.

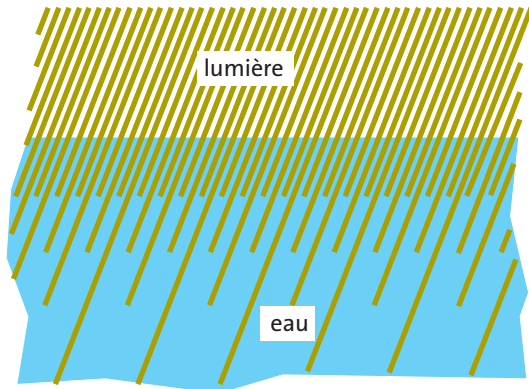


Fig. 1.88 Plus l'intensité de la lumière est faible, plus la diminution en fonction de la profondeur de l'eau est faible.

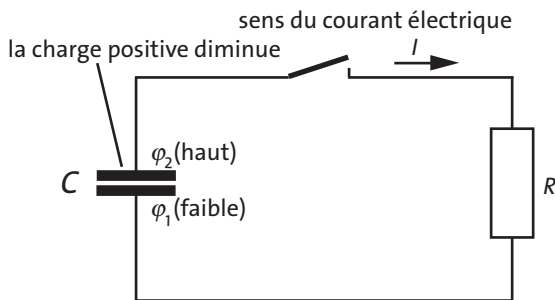


Fig. 1.89 Un courant positif entraîne une réduction de la charge du condensateur.

**Exemple : les lapins**

Nous supposons que quelques lapins sont abandonnés dans une zone où la nourriture est abondante et où ils ne sont pas menacés par des ennemis. Les lapins abandonnés vont se reproduire, Fig. 1.87. Ils auront des bébés lapins de telle sorte qu'il y aura plus de lapins à la génération suivante. Les enfants se reproduiront eux-mêmes et, à nouveau, il y aura plus de lapins. L'augmentation de la deuxième génération est plus importante que celle de la première, car il y a plus de parents. Donc : *plus le nombre de lapins est élevé, plus le taux de croissance est élevé.*

**Exemple : la lumière dans la mer**

La lumière du soleil frappe la surface de la mer, Fig. 1.88. L'eau n'est pas complètement pure mais absorbe partiellement la lumière. Nous supposons que la moitié de la lumière arrive à une profondeur de 10 m, c'est-à-dire que la moitié a été absorbée. Au cours des 10 m suivants, la moitié de la lumière restante est à nouveau absorbée, etc., d'où : *plus la quantité de lumière est faible, plus la quantité absorbée est faible.*

Nous utilisons la même méthode pour calculer comment la charge du condensateur diminue, comment la population de lapins augmente ou comment l'intensité de la lumière dans l'eau diminue. Nous allons apprendre à connaître cette méthode à l'aide d'un condensateur qui se décharge. Dans la résistance, le courant électrique  $I$  s'écoule du potentiel haut vers le potentiel bas, sur la Fig. 1.89 du haut vers le bas.

Ce courant fait diminuer la charge positive  $Q$  du condensateur (= charge de la plaque supérieure, chargée positivement). D'où :

$$I = -\frac{dQ}{dt}$$

Nous remplaçons maintenant

$$I = \frac{U}{R}$$

et

$$Q = C \cdot U$$

et nous obtenons

$$\frac{U}{R} = -C \frac{dU}{dt}$$

Nous reformulons légèrement l'équation et obtenons l'équation différentielle pour la décharge du condensateur à travers une résistance :



$$U + RC \frac{dU}{dt} = 0.$$

Que pouvons-nous faire avec une telle équation ? Outre la résistance  $R$  et la capacité  $C$ , dont nous supposons que les valeurs sont connues, l'équation contient la tension  $U$  et sa dérivée temporelle  $dU/dt$ .  $U$  est une fonction du temps. Ce que nous recherchons est la fonction  $U(t)$ . Nous devrions résoudre l'équation différentielle d'une manière ou d'une autre pour obtenir  $U$ . Cela n'est cependant pas possible avec les anciennes méthodes que vous connaissez car l'équation ne contient pas seulement  $U$  mais aussi sa dérivée temporelle.

Une telle équation peut être résolue de différentes manières. Nous aimerions aborder ici deux méthodes :

### 1. Solution numérique

Il existe des programmes informatiques pour effectuer cette tâche. Ils calculent la fonction  $U(t)$  point par point sur l'axe du temps. Par conséquent, on n'obtient pas une expression fonctionnelle mais un tableau de valeurs ou un diagramme.

### 2. Estimation d'une solution et insertion

Dans de nombreux cas, nous avons déjà une idée approximative de ce à quoi la solution pourrait ressembler. C'est également le cas ici. Nous le savons : plus la charge est faible, plus elle diminue lentement. Un tel comportement est décrit par une fonction exponentielle

$$y(x) = e^{-x}.$$

Plus  $x$  est grand, plus la variation  $dy/dx$  est faible. Par conséquent, nous essayons la *solution suivante* :

$$U(t) = U_0 \cdot e^{-t/\tau}. \tag{1.5}$$

Le facteur  $U_0$  est nécessaire pour garantir l'égalité des unités de mesure à droite et à gauche. Il en va de même pour l'exposant : il doit être « sans dimension », c'est-à-dire sans unité de mesure. Nous divisons donc le temps  $t$  par la quantité physique  $\tau$  qui est également mesurée en secondes.

Pour pouvoir vérifier si notre fonction hypothétique résout l'équation différentielle, nous avons également besoin de la dérivée de  $U(t)$  :

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{1}{\tau} \cdot U_0 \cdot e^{-t/\tau}. \tag{1.6}$$

Nous insérons (1.5) et (1.6) dans l'équation différentielle :

$$U_0 \cdot e^{-t/\tau} - \frac{RC}{\tau} \cdot U_0 \cdot e^{-t/\tau} = 0.$$

Nous divisons par

$$U_0 \cdot e^{-t/\tau},$$

reformulons et obtenons :

$$\tau = R \cdot C.$$

Qu'est-ce que cela signifie ? Notre solution hypothétique est-elle correcte ? Oui, elle l'est. Cela devient évident par le fait que la dépendance au temps a disparu. L'équation différentielle est résolue par la fonction que nous avons devinée :

$$U(t) = U_0 \cdot e^{-t/\tau}.$$

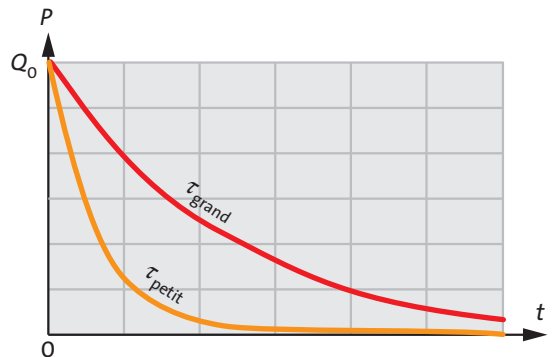
En outre, le calcul a montré que  $U_0$  peut avoir une valeur quelconque et que  $\tau$  est égal à  $R \cdot C$ . La signification de  $\tau$  est illustrée sur la Fig. 1.90 : plus  $\tau$  est grand, plus la fonction se stabilise lentement, plus le condensateur se décharge lentement.

Ceci est également conforme à notre attente : le condensateur se décharge lentement lorsque sa capacité est élevée et lorsque la résistance est élevée.  $\tau$  est appelé constante de temps.

Décharge d'un condensateur à travers une résistance : la tension diminue de façon exponentielle :

$$U(t) = U_0 \cdot e^{-t/\tau}.$$

$\tau = R \cdot C =$  constante de temps



**Fig. 1.90** Une grande constante de temps  $\tau$  signifie : la charge sur les plaques du condensateur diminue lentement.

Exercices

1. Utilisez une fonction quadratique comme solution hypothétique pour notre équation différentielle. L'équation différentielle est-elle satisfaite ? Commentez.
2. Les sphères conductrices sont souvent utilisées pour les expériences électrostatiques. Une sphère conductrice se compose d'un conducteur métallique et d'un axe en plexiglas — vous vous en souvenez. Si la sphère est chargée électriquement, la charge restera sur elle pendant un certain temps. Estimez à quelle vitesse elle va être évacuée, c'est-à-dire quelle sera la constante de temps. (Aide : estimez la capacité de la sphère par rapport à la Terre, ainsi que la résistance de la tige en plexiglas, à l'aide des formules correspondantes). Le résultat ne doit être exact qu'à un facteur 1000 près ; en d'autres termes : la constante de temps est d'environ :  $10^{-9}$  s,  $10^{-6}$  s,  $10^{-3}$  s, 1 s,  $10^3$  s,  $10^6$  s ou  $10^9$  s ?

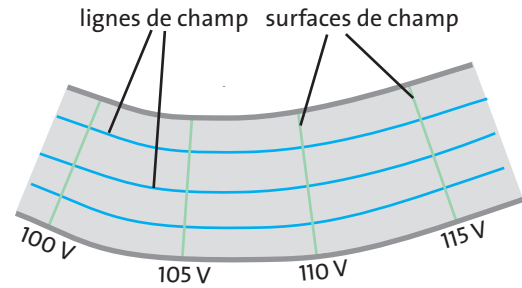


Fig. 1.92 Les surfaces de champ sont perpendiculaires à la direction du fil, les lignes de champ suivent le fil.

### 1.25 Champs et conducteurs électriques

Un long fil est relié à une alimentation électrique de sorte qu'il est parcouru par un courant électrique. Si nous nous déplaçons le long du fil, en commençant par la borne de potentiel élevé, le potentiel diminue avec la distance parcourue, Fig. 1.91. Le potentiel change de façon linéaire avec la distance le long du fil.

La Fig. 1.92 montre une section agrandie du fil. Les surfaces de champ, c'est-à-dire les surfaces de potentiel constant, coupent le fil perpendiculairement à sa direction longitudinale. Cela implique que les lignes de champ à l'intérieur du fil sont parallèles à la direction du fil. Aux endroits où le fil est droit, le champ est exactement homogène. Aux endroits où le fil est courbé, les lignes de champ suivent la courbure.

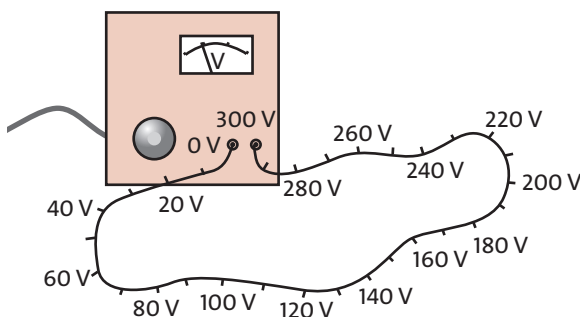


Fig. 1.91 Le potentiel dans le fil diminue de façon linéaire sur le chemin d'une borne à l'autre de l'alimentation.

Par conséquent, la charge électrique circule dans le fil dans le sens du potentiel descendant, toujours dans la direction des lignes de champ.

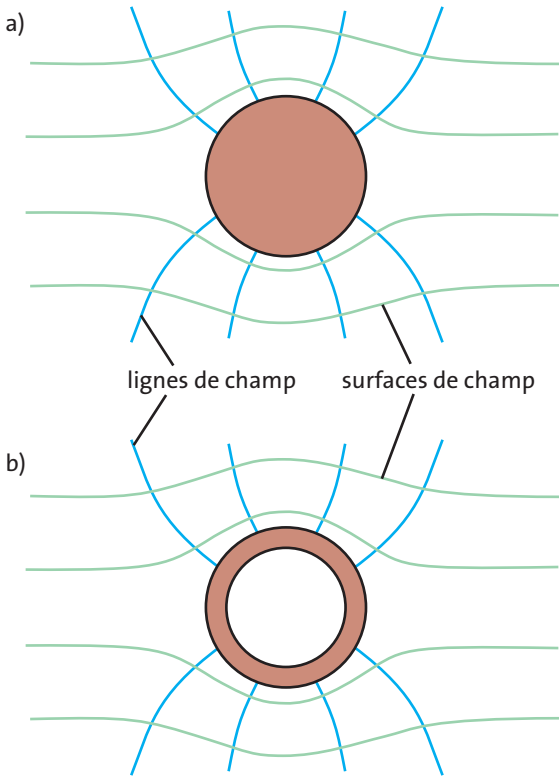
Nous pouvons également inverser la conclusion : lorsqu'un courant électrique circule dans un conducteur, il doit y avoir une variation du potentiel et par conséquent un champ électrique. Lorsqu'il n'y a pas de courant électrique dans un conducteur, l'intensité du champ dans le conducteur doit être nulle et il n'y a pas de variation du potentiel — le potentiel est le même partout.

Dans un conducteur dans lequel aucun courant électrique ne circule, le potentiel est le même partout.

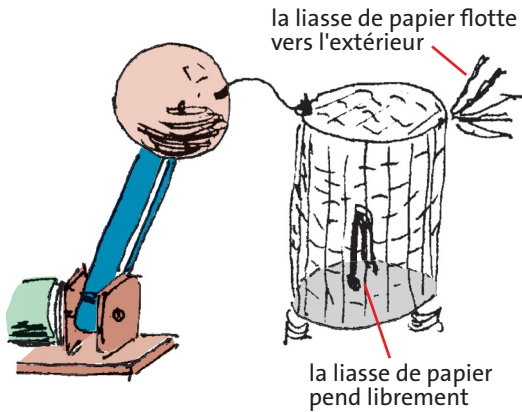
Maintenant, nous amenons un conducteur, une sphère métallique par exemple, à un endroit où existe un champ électrique, Fig. 1.93a. En étant placée à cet endroit, la charge électrique va se déplacer dans la sphère. Nous avons appelé ce processus l'induction. Cependant, le mouvement de la charge s'arrête après un temps très court. Il n'y a alors plus de courant électrique. Cela signifie que l'intérieur de la sphère est maintenant libre de tout champ. La sphère entière est au même potentiel exactement.

En particulier, la surface de la sphère est une surface à potentiel constant, c'est-à-dire une surface de champ. Ceci implique à son tour que les lignes de champ sur la surface extérieure de la sphère sont orthogonales à la surface.

Aucune de ces affirmations ne change dans le cas où le conducteur électrique est creux, Fig. 1.93b. Ceci a une conséquence intéressante : les champs électriques peuvent être confinés au moyen de parois métalliques. Il n'est même pas nécessaire que les parois soient hermétiquement fermées. Un treillis métallique est souvent suffisant.



**Fig. 1.93** (a) Le potentiel électrique est le même en tout point à l'intérieur de la sphère métallique. (b) Une sphère creuse est également libre de champ



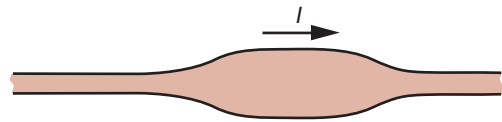
**Fig. 1.94** L'intérieur de la cage métallique est libre de tout champ.

La Fig. 1.94 montre un cylindre en treillis métallique relié à un générateur de Van de Graaff. Son potentiel est donc supérieur de plusieurs dizaines de milliers de volts au potentiel de la Terre, et il existe un champ électrique important entre le grillage et la Terre. Il peut être détecté grâce à la liasse de papier dont les extrémi-

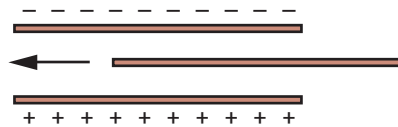
tés sont repoussées vers l'extérieur. En revanche, une liasse de papier à l'intérieur du grillage ne bouge pas. Bien que cet espace soit à un potentiel très élevé, il est libre de tout champ. Le potentiel  $y$  est le même partout.

**Exercices**

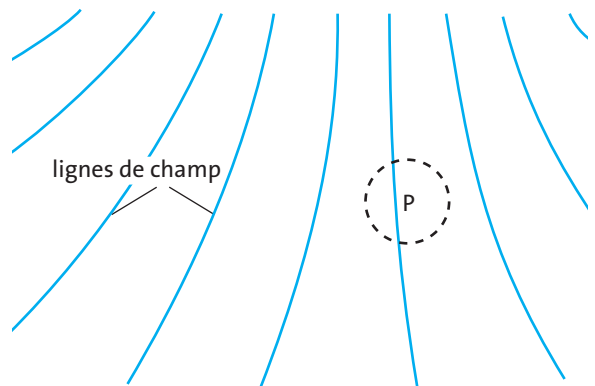
1. Un conducteur, dans lequel circule un courant électrique, devient plus épais à un endroit, Fig. 1.95. Dessinez les surfaces de champ et les lignes de champ à l'intérieur du conducteur. Faites attention aux distances entre les surfaces de champ.
2. Une plaque métallique est placée entre les plaques d'un condensateur chargé, parallèlement aux plaques du condensateur, Fig. 1.96. Dessinez les surfaces de champ et les lignes de champ. Quelle est la contrainte mécanique dans la plaque métallique : tension ou compression ? Quelle est sa direction ?
3. Une sphère métallique d'un diamètre d'environ 1 cm est amenée au point P du champ de la Fig. 1.97. Comment les surfaces et les lignes de champ vont-elles changer ?
4. Une fine plaque métallique est placée à l'endroit marqué par une ligne pointillée entre les deux charges de la Fig. 1.98. Dessinez les surfaces et les lignes de champ avant et après.



**Fig. 1.95** Pour l'exercice 1



**Fig. 1.96** Pour l'exercice 2



**Fig. 1.97** Pour l'exercice 3

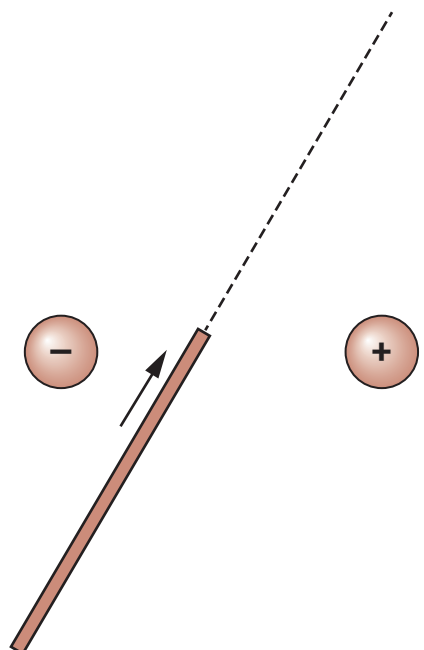


Fig. 1.98 Pour l'exercice 3

## 1.26 La densité de courant électrique – loi d'Ohm locale

La Fig. 1.99 est une vue agrandie d'un fil dans lequel circule un courant électrique. Nous supposons que le courant est de 6 A. Au point P, la section transversale du fil passe de 2 mm<sup>2</sup> à 8 mm<sup>2</sup>. Nous observons une petite section transversale du fil, au point A où le fil est mince, ainsi qu'au point B où il est épais. Comment le courant électrique diffère-t-il entre ces deux zones ? Le courant qui circule à travers la section A est quatre fois

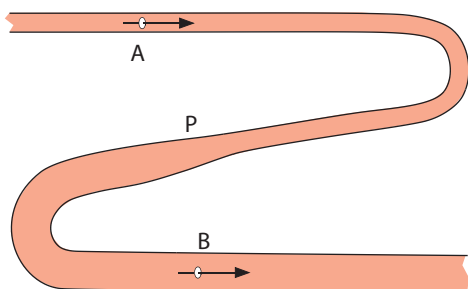


Fig. 1.99 Fil dans lequel circule un courant électrique. La section transversale est multipliée par quatre en P. La densité du courant électrique est donc quatre fois plus élevée en A qu'en B.

supérieur au courant qui circule à travers la section B. Ce n'est qu'ainsi que le même courant peut circuler dans les sections transversales totales en A et en B.

Ce que nous venons de comparer est la *densité de courant électrique*  $j$ . La densité de courant électrique est le courant électrique dans un conducteur divisé par la section transversale du conducteur :

$$j = \frac{I}{A}$$

(La densité de courant de quantité de mouvement a été définie de manière analogue : courant de quantité de mouvement divisé par la section transversale du conducteur de quantité de mouvement ; voir section 1.19).

Par conséquent, la densité de courant électrique dans la zone mince de notre fil est de

$$j_{\text{mince}} = \frac{6 \text{ A}}{2 \text{ mm}^2} = 3 \text{ A/mm}^2$$

et dans la partie épaisse

$$j_{\text{épais}} = \frac{6 \text{ A}}{8 \text{ mm}^2} = 0,75 \text{ A/mm}^2.$$

Alors que le courant nous indique la charge électrique totale qui circule dans une section transversale de fil par unité de temps, la densité de courant nous indique la quantité de courant qui circule « en un point ».

Nous aimerions maintenant modifier la forme de la loi d'Ohm

$$R = \frac{U}{I}.$$

Tout d'abord, nous faisons passer le courant du côté gauche de l'équation :

$$I = \frac{U}{R}$$

Ensuite, nous insérons l'expression pour la résistance

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{d}{A}$$

et nous obtenons :

$$I = \frac{\sigma A}{d} \cdot U.$$

Un simple réarrangement conduit à :

$$\frac{I}{A} = \frac{\sigma}{d} \cdot U.$$

Cette équation peut aussi être simplifiée : à gauche, on trouve la densité de courant électrique  $I/A$ , et à

droite, l'intensité du champ électrique  $U/d$  ainsi que la conductivité  $\sigma$ . Nous pouvons donc écrire :

$$\vec{j} = \sigma \cdot |\vec{E}|.$$

Mais, tout comme l'intensité du champ électrique, la densité de courant est aussi un vecteur. Sa direction est égale à la direction du courant électrique. Notre équation finale est donc :

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad \text{loi d'Ohm locale}$$

Ce que nous avons déduit au prix d'un certain effort n'est pas fondamentalement nouveau. Nous pouvons dire qu'il s'agit de la forme « locale » de la loi d'Ohm. La loi d'Ohm dans sa forme habituelle nous dit : le courant électrique est proportionnel à la tension, ou en bref : le courant est proportionnel à la force motrice. Notre nouvelle équation exprime exactement la même chose. Seulement, ici, nous utilisons la tension par unité de longueur, c'est-à-dire l'intensité du champ électrique, comme mesure de la force motrice, et le courant par unité de surface, c'est-à-dire la densité de courant, comme mesure du courant. Alors que la loi d'Ohm, dans son ancienne forme, concerne l'ensemble du fil, notre nouvelle loi locale prend en compte un endroit donné du fil.

### Exercices

1. Un fil de cuivre d'une longueur de 100 m et d'une section de  $1 \text{ mm}^2$  est relié à une batterie de 1,5 V par ses deux extrémités. Quelle est l'intensité du champ dans le fil ? Quelle est la densité de courant ? Quel est le courant dans le fil ?
2. Un fil de cuivre de  $3 \text{ mm}^2$  de section est parcouru par un courant électrique de 5 A. Quelle est l'intensité du champ dans le fil ? Comparez avec l'intensité du champ dans un condensateur dont la distance entre les plaques est de 5 mm et qui a été chargé avec 1 kV.
3. Un fil de cuivre d'une longueur de 2 m est connecté à un fil de fer d'une longueur de 1 m (la section des deux fils est de  $1 \text{ mm}^2$ ). Un courant électrique de 0,5 A circule dans l'ensemble du fil de 3 m de long. Quelle est l'intensité du champ dans le fil de cuivre et dans le fil de fer ? Quelle est la différence de potentiel entre les extrémités du fil de cuivre et entre les extrémités du fil de fer ?
4. Le filament d'une ampoule est un peu plus épais que la normale à un endroit A et un peu plus mince que la normale à un endroit B. Que pouvez-vous dire des densités de courant aux endroits A et B pendant que la lampe est allumée ? À quel endroit le filament brûlera-t-il à un moment donné ?

## 1.27 Comment charger en énergie des particules chargées électriquement – les faisceaux d'électrons

Souvenons-nous d'un résultat précédent : pour amener une quantité de charge électrique  $\Delta Q$  dans un conducteur d'un endroit de bas potentiel  $\varphi_1$  à un endroit de haut potentiel  $\varphi_2$ , nous avons besoin d'énergie. Si la quantité de charge se déplace du potentiel élevé au potentiel faible, elle reçoit de l'énergie. La quantité de cette énergie est :

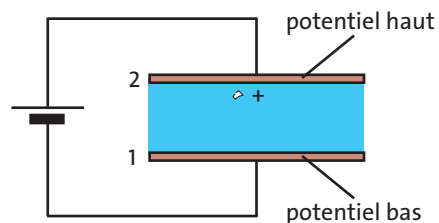
$$\Delta E = (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot \Delta Q$$

Nous pouvons maintenant enlever la restriction selon laquelle la charge doit se déplacer dans un conducteur électrique. L'équation est également valable si un corps ou une particule chargée se déplace en dehors de conducteurs électriques. La particule chargée de la Fig. 1.100 peut être un bout de papier qui a été chargé par le contact avec la plaque 2.

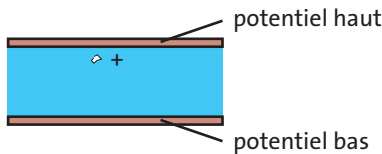
D'où vient l'énergie qui est fournie au bout de papier sur le chemin de la plaque 2 à la plaque 1 ? La plaque 2 a perdu une petite quantité de sa charge et la plaque 1 a reçu cette charge. En raison du déplacement de la petite quantité de charge, le condensateur aura perdu une partie de sa charge. Cependant, la charge manquante est fournie par la pile en compensation. Par conséquent, l'énergie que la petite quantité de charge reçoit provient de la pile.

Pour faire passer un corps chargé positivement du potentiel bas au potentiel haut, il faut lui fournir de l'énergie. Lorsqu'il passe du potentiel élevé au potentiel bas, il libère l'énergie.

(Dans le cas d'une charge négative, l'énoncé de la phrase sera inversé : pour amener un corps chargé nég-



**Fig. 1.100** La particule chargée absorbe de l'énergie sur son chemin du potentiel haut au potentiel bas. Cette énergie est fournie par la pile.



**Fig. 1.101** La particule chargée absorbe de l'énergie sur son chemin du potentiel élevé au potentiel faible. Cette énergie provient du champ électrique entre les plaques.

gativement du potentiel élevé au potentiel bas, il faut lui fournir de l'énergie. Lorsqu'il se déplace du potentiel bas au potentiel haut, il libère l'énergie).

La Fig. 1.101 montre pratiquement la même expérience que la Fig. 1.100. La seule différence est que les plaques chargées ne sont pas connectées à la pile. Cependant, l'expérience fonctionne toujours de la même manière. Le morceau de papier chargé se déplace de la plaque à haut potentiel vers celle à bas potentiel. D'où vient l'énergie maintenant ? La particule en mouvement transporte une charge électrique d'une plaque à l'autre. Le condensateur est donc déchargé dans une certaine mesure. Cependant, cela signifie que le champ entre les plaques devient un peu plus faible. L'énergie provient donc du champ électrique.

Lorsqu'un corps chargé se déplace d'un potentiel élevé à un potentiel faible et qu'il ne peut pas se débarrasser de l'énergie qu'il reçoit, il doit conserver cette énergie. Il devient plus rapide, son énergie cinétique augmente.

Nous avons donc trouvé une possibilité de charger un corps en énergie cinétique. Bien que cette méthode ne soit pas adaptée aux corps macroscopiques, c'est-à-dire très grands, elle est extrêmement efficace pour les corps microscopiques, c'est-à-dire les particules. C'est ce que montre l'exemple suivant : combien d'énergie un électron gagne-t-il lorsqu'il passe d'une « électrode » au potentiel de la Terre (0 V) à une électrode à +20 000 V ? (Comme l'électron est chargé négativement, il gagnera de l'énergie lorsqu'il passera du potentiel faible au potentiel élevé).

Avec  $Q = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , nous obtenons

$$E = (0 \text{ V} - 20\,000 \text{ V}) \cdot (-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) = 3,2 \cdot 10^{-15} \text{ J}$$

Cette valeur ne semble pas très élevée à première vue. Mais en calculant la vitesse associée, nous pouvons voir qu'elle est effectivement très élevée pour le petit électron. D'après

$$E = \frac{m}{2} v^2$$

nous obtenons

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-15} \text{ J}}{0,91 \cdot 10^{-30} \text{ kg}}} \approx 8,4 \cdot 10^7 \text{ m/s.}$$

Cela représente environ un quart de la vitesse de la lumière, c'est-à-dire la plus grande vitesse de transport existante.

Lorsque l'on charge de cette manière des particules avec de l'énergie, leur énergie n'est généralement pas indiquée dans l'unité de mesure joule mais en *électron-volt*, abrégé en eV.

Ici, le « e » désigne simplement la charge élémentaire, c'est-à-dire

$$1 \text{ eV} = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{V} = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

1 eV = énergie qu'une particule de charge  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  absorbe en traversant une différence de potentiel de 1 V.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Quelle est la raison de cet écart par rapport au système SI ? Lorsqu'il s'agit de particules qui portent toutes une charge élémentaire positive ou négative, comme les électrons, les protons ou les positrons, le eV est tout simplement plus pratique. Si, par exemple, des électrons sont accélérés sur une différence de potentiel de 8 kV, leur énergie cinétique à la fin sera de 8 keV. Aucun calcul n'est donc nécessaire pour obtenir l'énergie.

### Exercices

1. Une goutte d'eau chargée avec 50 charges négatives élémentaires ( $m = 10 \text{ mg}$ ) tombe dans un nuage d'orage de 1000 m d'épaisseur à travers une différence de potentiel de 20 MV. (Le potentiel diminue vers le bas.) Quelle quantité d'énergie prend-elle dans le champ gravitationnel ? Combien d'énergie libère-t-elle dans le champ électrique ? Son énergie cinétique n'a pas changé pendant sa chute. Pourquoi ? Où est passé l'excès d'énergie ?
2. Dans un générateur de Van de Graaff, la charge électrique est continuellement « pompée » du potentiel de la Terre jusqu'à 50 kV. Nous supposons que le courant électrique qui est généré par le générateur est de 50  $\mu\text{A}$ . Quelle est la consommation d'énergie résultante du générateur de Van de Graaff ? (En fait, il a besoin de beaucoup plus : la majeure partie de l'énergie est perdue par frottement).
3. Les électrons dans un microscope électronique sont accélérés avec une tension de 1,2 MV.
  - (a) Quelle est l'énergie des électrons ?
  - (b) Calculez la vitesse des électrons à l'aide de la formule de l'énergie cinétique. Comment peut-on voir que le résultat doit être faux ? Quelle étape du calcul est erronée ?



## 2 LE CHAMP MAGNÉTIQUE

### 2.1 Charge magnétique et champ magnétique

Les aimants peuvent s'attirer ou se repousser. L'attraction et/ou la répulsion sont dues à la *charge magnétique*  $Q_m$ . Les parties de l'aimant où se trouve la charge magnétique sont appelées pôles de l'aimant. L'unité de mesure de la charge magnétique est le weber (Wb).

Tout comme la charge électrique, la charge magnétique peut prendre des valeurs positives et négatives. Les zones présentant une charge magnétique positive sont appelées pôles nord, les zones présentant une charge magnétique négative sont appelées pôles sud.

Un petit aimant comme celui que nous utilisons pour fixer quelque chose sur une paroi métallique a une charge d'environ  $10^{-4}$  Wb à son pôle positif.

Si un aimant droit, en forme de barre, dont les pôles sont situés à ses extrémités, est suspendu horizontalement à un fil fin de manière à pouvoir tourner facilement, il s'alignera dans la direction nord-sud. Le pôle positif est orienté vers le nord, le pôle négatif vers le sud.

La charge magnétique globale d'un aimant est toujours nulle, c'est-à-dire que la charge positive a la même valeur absolue que la charge négative.

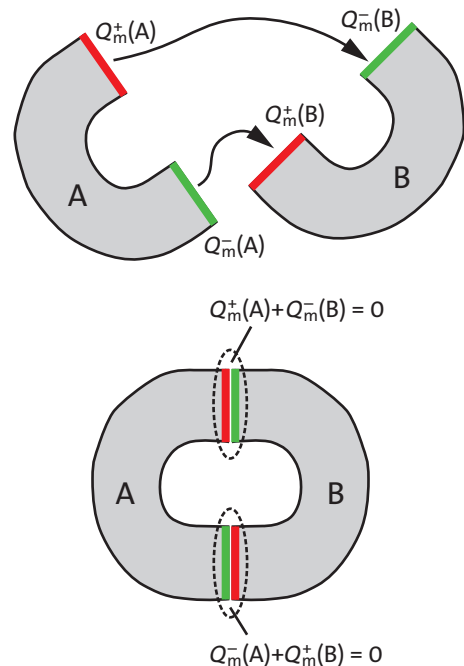
La charge magnétique totale d'un aimant est nulle.

C'est différent de ce qui se passe dans le cas de la charge électrique. Un corps peut être doté d'une charge électrique nette (bien qu'elle soit très faible). Cette différence entre la charge électrique et la charge magnétique est très importante. Elle signifie qu'il existe des courants électriques (charge électrique qui circule) mais pas de courants magnétiques (pas de charge magnétique qui circule).

Une entité invisible est attachée aux charges magnétiques : le champ magnétique (tout comme le champ électrique est attaché aux charges électriques). Cette

entité existe et on peut se la représenter de manière imagée sous la forme matérielle d'une « substance de champ magnétique ».

Les pôles magnétiques sont entourés de champ magnétique. Si la charge de deux pôles a le même signe (plus ou moins), le champ les repousse l'un de l'autre ; si elle a des signes différents, le champ les attire l'un vers l'autre.



**Fig. 2.1** Si les deux aimants identiques A et B sont réunis de manière à ce que le pôle nord de A vienne au contact du pôle sud de B, et que le pôle sud de A vienne au contact du pôle nord de B, la charge magnétique au niveau des deux zones de contact s'additionnera pour devenir nulle.



## Magnétisation

Dans les aimants conventionnels, la charge magnétique se trouve généralement à la surface. Ceci peut être illustré de la manière suivante, Fig. 2.1.

Prenons deux aimants identiques en fer à cheval A et B. Pour chaque aimant pris individuellement, la charge  $Q_m^-$  du pôle sud est égale à la valeur négative de la charge  $Q_m^+$  du pôle nord :

$$Q_m^- = -Q_m^+ \quad (2.1)$$

Comme les deux aimants sont identiques, la charge positive au pôle nord de l'un est égale à la charge positive au pôle nord de l'autre :

$$Q_m^+(A) = Q_m^+(B) \quad (2.2)$$

De plus, nous avons :

$$Q_m^-(A) = Q_m^-(B).$$

Si les deux aimants sont maintenus ensemble de manière à ce que le pôle nord de A rejoigne le pôle sud de B et que le pôle sud de A rejoigne le pôle nord de B, les charges au niveau des zones de contact s'additionneront pour devenir égales à zéro.

La charge au niveau d'une zone de contact est :

$$Q_m^+(A) + Q_m^-(B)$$

Au moyen de l'équation (2.1), nous pouvons remplacer  $Q_m^-(B)$  par  $-Q_m^+(B)$  :

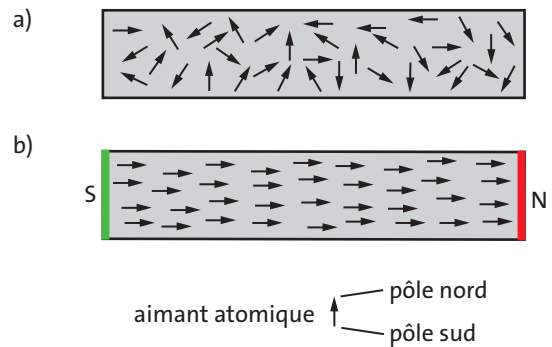
$$Q_m^+(A) - Q_m^+(B)$$

Cette expression, cependant, est nulle selon l'équation (2.2). Ainsi, le nouvel aimant en forme d'anneau que nous avons créé en combinant les deux aimants en fer à cheval n'a pas de champ magnétique. L'anneau peut-il même être considéré comme un aimant ? Nous répondrons à cette question dans la section suivante.

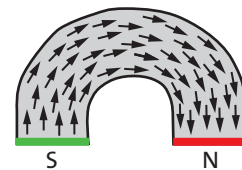
## 2.2 Magnétisation

Il existe de nombreux matériaux magnétiques différents : éléments chimiques, composés, alliages et matériaux céramiques. Le matériau le plus connu et le plus fréquemment utilisé, bien qu'il ne soit pas le meilleur, est le fer.

Il existe une explication simple au fait qu'un aimant porte toujours une quantité égale de charge magné-



**Fig. 2.2** (a) Dans un morceau de fer non magnétisé, les directions des petits aimants atomiques ne sont pas alignées. (b) Dans un morceau de fer magnétisé, les aimants atomiques sont alignés. Il y a une charge négative à l'extrémité gauche de l'aimant et une charge positive à l'extrémité droite.



**Fig. 2.3** Orientation des petits aimants atomiques dans un aimant en fer à cheval.

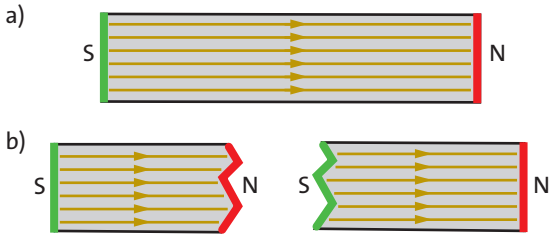
tique positive et négative : certains atomes sont magnétiques, c'est-à-dire que chaque atome se comporte comme un petit aimant permanent à deux pôles. Si un objet est constitué de tels atomes et si, en plus, les aimants atomiques n'ont pas une orientation complètement irrégulière, Fig. 2.2a, mais qu'ils sont alignés de manière régulière, un grand pôle magnétique apparaîtra à chacune des deux extrémités de l'aimant.

Bien entendu, il n'est pas nécessaire que les petits aimants atomiques soient tous parallèles les uns aux autres. Ils pourraient, par exemple, avoir une orientation telle qu'illustrée à la Fig. 2.3.

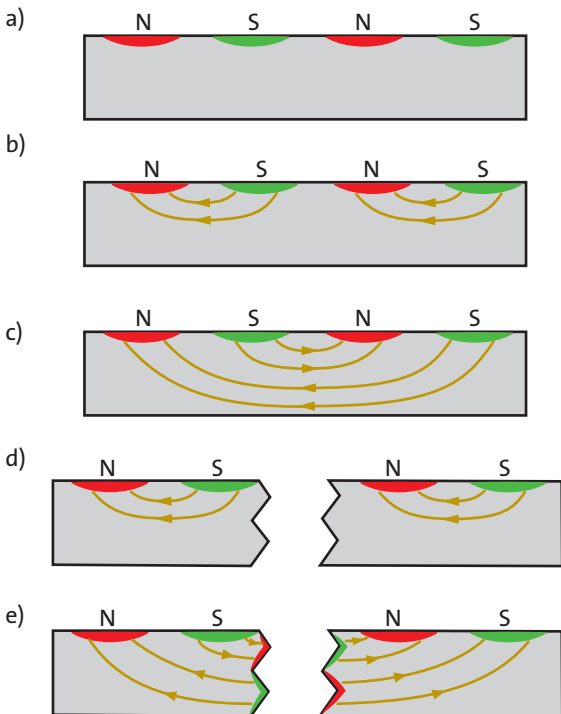
Lorsque les aimants atomiques sont alignés, on dit que le matériau est magnétisé.

Dans les Fig. 2.2 et Fig. 2.3, nous avons illustré l'état de magnétisation au moyen de nombreuses petites flèches. Une méthode d'illustration graphique un peu plus claire est présentée à la Fig. 2.4a. Ici, des lignes continues, les lignes de magnétisation, ont été dessinées à la place des flèches. La figure montre la relation entre l'aimantation et la charge magnétique : la charge magnétique se trouve là où les lignes de magnétisation se terminent à la surface.

Cependant, les lignes de magnétisation peuvent également être situées à l'intérieur de l'aimant sans



**Fig. 2.4** a) Représentation graphique de l'état de magnétisation au moyen de lignes de magnétisation. b) De nouveaux pôles se forment lorsque l'aimant est brisé.



**Fig. 2.5** (a) Un aimant avec 4 pôles sur la même face. (b) et (c) Il y a plusieurs possibilités pour la magnétisation. (d) et (e) La différence entre (b) et (c) est visible si l'on casse l'aimant en son milieu.

point de départ ni d'arrivée. Dans ce cas, l'aimant correspondant n'a pas de pôles. L'anneau que nous avons créé à partir de deux aimants en fer à cheval (Fig. 2.1) illustre ce cas.

Les lignes de magnétisation commencent sur une charge magnétique négative et se terminent sur une charge magnétique positive, ou bien elles courent à l'intérieur d'un aimant sans point de départ ni d'arrivée.

Les lignes de magnétisation sont généralement marquées d'une flèche directionnelle. Par convention, elles sont orientées de la charge négative vers la charge positive.

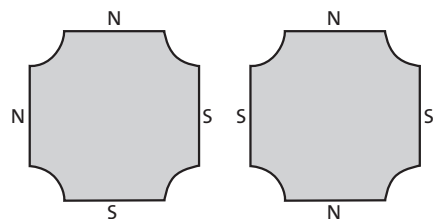
Nous pouvons maintenant comprendre un autre phénomène intéressant. Lorsqu'on casse un aimant droit, deux nouveaux pôles émergent au niveau des surfaces de rupture, Fig. 2.4. C'est la seule façon de garantir que la charge magnétique globale de chacun des deux morceaux sera à nouveau nulle.

Si la magnétisation est connue, nous pouvons dire sans ambiguïté où se trouve la charge magnétique : au point de départ et d'arrivée des lignes de magnétisation.

Si, par contre, on ne connaît que les pôles d'un aimant, c'est-à-dire la répartition de la charge magnétique à sa surface, on ne peut pas encore tirer de conclusion claire sur la magnétisation. La distribution de la charge de la Fig. 2.5a est compatible avec la distribution de la magnétisation de la Fig. 2.5b ainsi qu'avec celle de la Fig. 2.5c. L'état de magnétisation réel ne peut pas être vu de l'extérieur de l'aimant. Une méthode pour différencier les deux possibilités consiste à briser l'aimant. La rupture de l'aimant de la Fig. 2.5b ne conduit pas à la formation de nouveaux pôles, Fig. 2.5d. En revanche, si l'aimant de la Fig. 2.5c est brisé, de nouveaux pôles nord et sud apparaissent, Fig. 2.5e.

### Exercices

1. Comment pourrait être le parcours des lignes de magnétisation dans l'aimant de la Fig. 2.6a ?
2. Comment pourraient être les lignes de magnétisation dans l'aimant de la Fig. 2.6b ? Indiquez deux solutions.
3. Un aimant a la forme d'une tranche cylindrique. Sur sa surface cylindrique, l'aimant possède 3 pôles nord et 3 pôles sud. Les pôles nord et sud sont alternés et sont répartis régulièrement sur la circonférence du cylindre. Comment pourrait être la magnétisation du cylindre ? Indiquez deux solutions.
4. Quelqu'un vous donne un anneau d'acier et vous dit que l'anneau est magnétisé de telle manière que les lignes de magnétisation suivent la forme de l'anneau. Par conséquent, l'aimant n'a pas de pôles. Comment pouvez-vous déterminer si cette affirmation est vraie ?



**Fig. 2.6** Pour les exercices 1 et 2. Quel est le tracé des lignes de magnétisation ?

## 2.3 L'intensité du champ magnétique

Nous allons maintenant introduire une mesure pour quantifier la « substance » du champ magnétique : l'intensité du champ magnétique. Nous utilisons une méthode analogue à celle utilisée pour l'introduction de l'intensité du champ électrique. De la même façon dans un champ magnétique, il y a une contrainte de traction en chaque point dans une direction donnée, et une contrainte de compression dans toutes les directions qui lui sont perpendiculaires. Ainsi, l'intensité du champ magnétique est un vecteur orienté dans la direction de la contrainte de traction du champ. Son amplitude (la norme du vecteur) nous indique combien le champ est « dense » en ce point.

L'intensité du champ magnétique est un vecteur.

*Norme du vecteur :* mesure de la densité de la « substance » du champ magnétique.

*Direction du vecteur :* direction de traction du champ magnétique.

Le processus de mesure est également analogue à celui de l'intensité du champ électrique. Une « charge test » magnétique, c'est-à-dire un pôle d'un barreau aimanté très fin et long, est amenée au point P où l'intensité du champ doit être mesurée. (L'autre pôle de l'aimant est si éloigné qu'il ne « ressent » plus le champ). Alors, un courant de quantité de mouvement circule dans ce pôle magnétique. À l'aide d'un appareil de mesure du courant de quantité de mouvement (un dynamomètre), nous déterminons la norme et la direction du vecteur courant de quantité de mouvement. Ensuite, nous divisons par la charge magnétique du pôle et nous obtenons l'intensité du champ magnétique :

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{Q_m}$$

L'expression du courant de quantité de mouvement est alors :

$$\vec{F} = Q_m \cdot \vec{H}$$

$\vec{F}$  = courant de quantité de mouvement dans le pôle

$Q_m$  = charge magnétique du corps

$\vec{H}$  = intensité du champ magnétique

L'équation a la même structure que deux autres équations que nous connaissons déjà :

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E} \quad \text{et} \quad \vec{F} = m \cdot \vec{g}$$

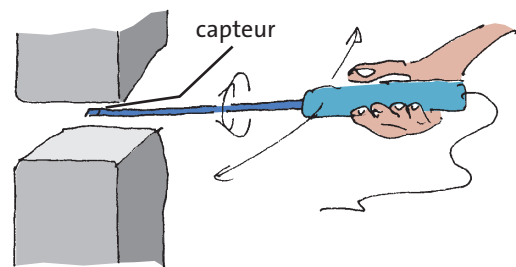
Si la charge magnétique du pôle est doublée, le courant de quantité de mouvement sera également doublé. Le quotient du courant de quantité de mouvement et de la charge est indépendant de la charge du pôle. Et c'est ainsi que cela doit être. Bien que le pôle modifie considérablement le champ existant à l'origine, l'équation nous indique toujours l'intensité du champ indépendamment de la charge du pôle.

Comme unité de mesure de l'intensité du champ magnétique, nous obtenons le quotient newton/weber. Cette unité peut être transformée en une unité plus courante, l'ampère/mètre.

Le procédé de mesure de l'intensité du champ magnétique que nous venons de décrire est pratiquement aussi rarement utilisé que la méthode correspondante pour mesurer l'intensité du champ électrique.

Les intensités de champ magnétique peuvent être mesurées de manière particulièrement pratique à l'aide d'un appareil dont nous ne pouvons pas encore comprendre la fonctionnalité pour le moment mais dont le mode d'utilisation peut être facilement décrit. Le capteur plat équipé d'une poignée est relié à l'écran par un câble. Pour mesurer l'intensité du champ magnétique en un point donné de l'espace, on tient le capteur en ce point. L'appareil affiche une certaine valeur. Cette valeur dépend toutefois encore de l'orientation de la surface du capteur. C'est pourquoi on tourne le capteur dans les différentes directions jusqu'à ce que l'affichage ait atteint sa valeur maximale, Fig. 2.7. C'est alors que nous connaissons non seulement la norme de l'intensité du champ, mais aussi sa direction : le vecteur de l'intensité du champ est perpendiculaire à la surface du capteur.

Pour la représentation graphique d'un champ magnétique, nous pouvons utiliser les mêmes méthodes que pour l'illustration des champs électriques : avec différentes nuances de gris, avec des flèches vectorielles ou avec des lignes de champ et des surfaces de champ.



**Fig. 2.7** Le capteur est tourné jusqu'à ce que la valeur affichée par le compteur soit la plus élevée. C'est ainsi que l'on peut déterminer la direction de l'intensité du champ magnétique en plus de sa norme.

Pour le dessin des lignes de champ et des surfaces de champ des champs magnétiques, on applique les mêmes règles que pour le dessin des lignes de champ et des surfaces de champ des champs électriques :

- Les lignes de champ sont perpendiculaires aux surfaces de champ en chaque point.
- Les lignes de champ commencent aux pôles positifs et se terminent aux pôles négatifs.
- Plus la charge magnétique est importante, plus il y a de lignes de champ commençant ou se terminant à un pôle.
- Les lignes de champ ne se croisent pas.
- Les surfaces de champ ne se croisent pas.
- Les lignes de champ et les surfaces de champ ne forment pas de coudes.
- Une image de champ a la même symétrie que les charges magnétiques.

De même, l'addition vectorielle des intensités de champ magnétique a la même signification que celle des intensités de champ électrique. Considérons deux aimants A et B. Nous supposons que l'intensité du champ de A seul est connue pour chaque point, tout comme celle du champ de B seul. Si nous plaçons les deux aimants l'un à côté de l'autre, il y aura un champ différent du champ de A seul et différent du champ de B seul. L'intensité du champ résultant est obtenue par l'addition vectorielle des intensités de champ des aimants individuels.

### Exercices

1. Une aiguille de boussole d'une longueur de 5 cm est tenue perpendiculairement au champ magnétique de la Terre. Le pôle positif de l'aiguille porte une charge magnétique de  $10^{-5}$  Wb, le pôle négatif porte  $-10^{-5}$  Wb. (a) Quel courant de quantité de mouvement circule dans le champ magnétique vers le pôle positif et quel courant de quantité de mouvement circule vers le pôle négatif ? (L'intensité du champ magnétique de la Terre est de 6,4 A/m). (b) Comment l'aiguille de la boussole réagit-elle ?
2. Dessinez les lignes de champ sur les Fig. 2.8a et Fig. 2.8b. (Les figures montrent les surfaces du champ).

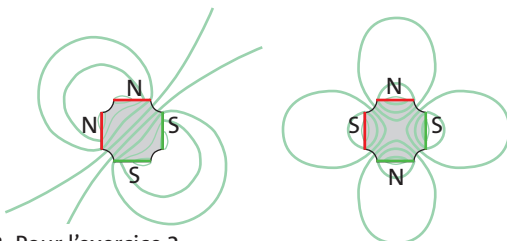


Fig. 2.8 Pour l'exercice 2

## 2.4 Lignes de magnétisation et lignes de champ

Nous avons vu qu'à la fois l'état de magnétisation d'un matériau ainsi que le champ magnétique peuvent être représentés graphiquement à l'aide de lignes : au moyen de lignes de magnétisation dans le matériau, au moyen de lignes de champ pour le champ. Nous souhaitons maintenant utiliser les deux représentations sur une seule figure. Pour cela, nous rappelons les règles : les lignes de magnétisation commencent au pôle négatif et se terminent au pôle positif, les lignes de champ magnétique commencent au pôle positif et se terminent au pôle négatif. Nous pouvons résumer ces règles :

Les lignes de champ magnétique commencent là où les lignes de magnétisation finissent, et vice versa.

A titre d'exemple, nous considérons un pôle magnétique positif individuel, Fig. 2.9, qui peut être l'extrémité d'un long aimant droit. Le pôle négatif de l'aimant doit être situé si loin que son champ ne peut plus être ressenti à l'endroit du pôle positif.

Pour le moment, considérez que les lignes de champ traversent le matériau de l'aimant (qui sera qualifié à la section 2.7 de « matériau magnétique dur ») comme elles traversent un espace vide.

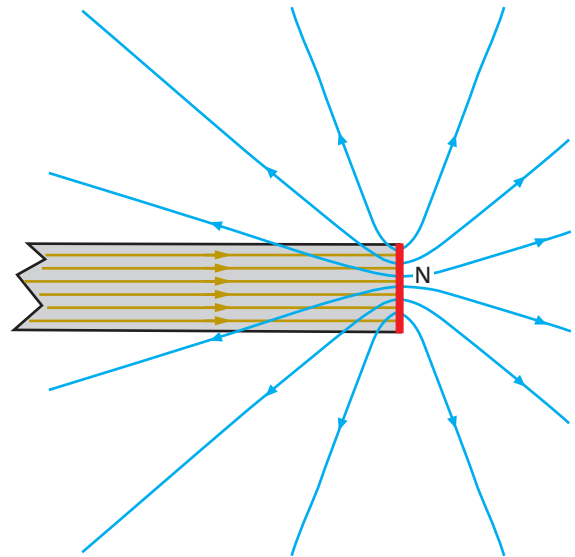
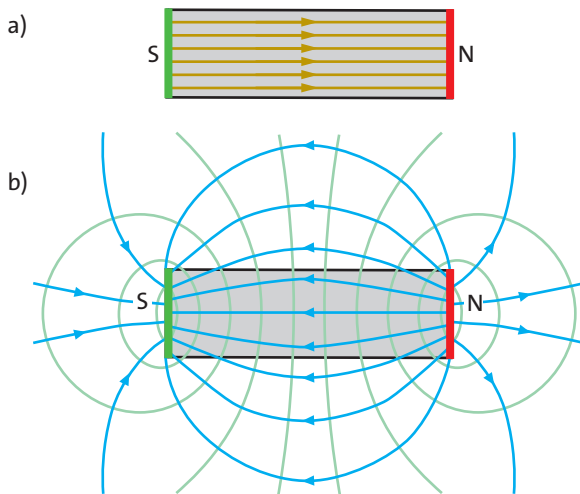
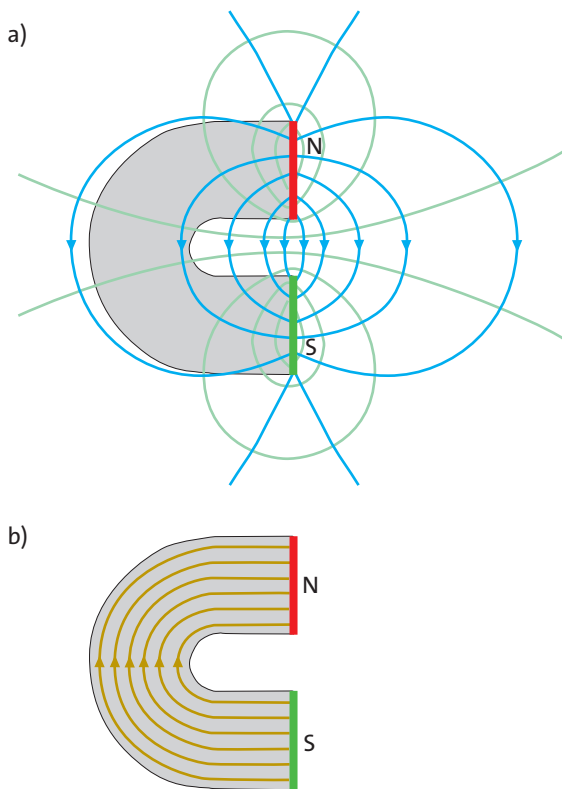


Fig. 2.9 L'extrémité positive d'un long aimant droit avec les lignes de magnétisation et les lignes de champ.

## Quatre champs magnétiques importants



**Fig. 2.10** Aimant droit. La charge magnétique réside sur les surfaces d'extrémité.  
(a) lignes de magnétisation ;  
(b) lignes de champ et surfaces de champ



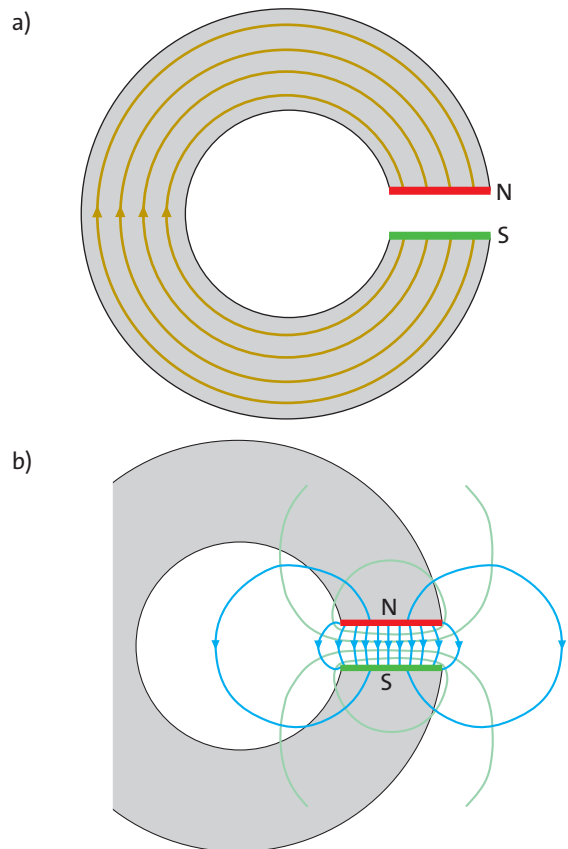
**Fig. 2.11** Aimant en fer à cheval. La charge magnétique se situe sur les surfaces d'extrémité.  
(a) lignes de magnétisation ;  
(b) lignes de champ et surfaces de champ

## 2.5 Quatre champs magnétiques importants

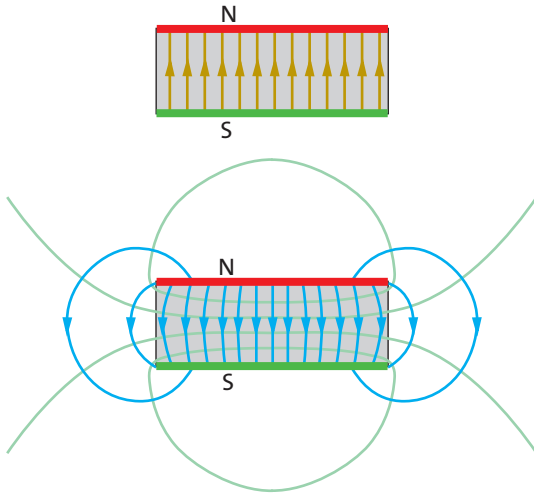
Chaque figure se compose de deux parties. La première partie montre (outre l'aimant) les lignes de magnétisation, la seconde montre les lignes de champ et les surfaces de champ. Il serait plus agréable d'illustrer les lignes de magnétisation, les lignes de champ et les surfaces de champ en une seule image. Cependant, comme il y a généralement à la fois des lignes de magnétisation, des lignes de champ et des surfaces de champ au même endroit à l'intérieur des corps magnétisés, une telle représentation prêterait à confusion.

### 1. Aimant droit

La charge magnétique se trouve sur les surfaces d'extrémité. La magnétisation, Fig. 2.10a, est homogène ; le champ, Fig. 2.10b, ne l'est pas. Un tel aimant est également appelé un dipôle magnétique.



**Fig. 2.12** Aimant en anneau avec un jeu.  
(a) lignes de magnétisation ;  
(b) lignes de champ et surfaces de champ



**Fig. 2.13** Aimant en forme de disque. La charge magnétique se trouve sur les faces supérieure et inférieure du disque.

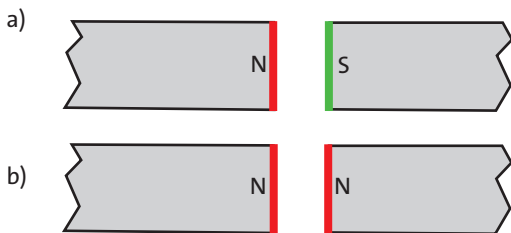
(a) lignes de magnétisation ;  
(b) lignes de champ et surfaces de champ

## 2. Aimant en fer à cheval

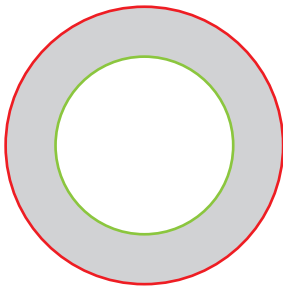
Les lignes de magnétisation suivent la forme de l'aimant ; la charge magnétique se situe à nouveau sur les surfaces d'extrémité, Fig. 2.11.

## 3. Aimant en anneau avec entrefer

La charge magnétique se trouve sur les surfaces planes des deux côtés de l'entrefer, Fig. 2.12a. Sur la Fig. 2.12b,



**Fig. 2.14** Pour les exercices 1 et 2



**Fig. 2.15** Pour l'exercice 3

la zone de l'entrefer est représentée avec des lignes et des surfaces de champ dans une vue agrandie. Le champ est essentiellement limité à la zone de l'entrefer et il est presque homogène. Les lignes et surfaces de champ de ce champ magnétique ont la même forme que les lignes et surfaces de champ du champ électrique d'un condensateur.

## 4. Aimant en forme de disque

Il a précisément la forme de la pièce manquante de l'aimant annulaire de la Fig. 2.12, Fig. 2.13. La charge magnétique se trouve sur la face supérieure et sur la face inférieure du disque. Par conséquent, la distribution de la charge est la même que celle de l'aimant annulaire avec un entrefer. Cela implique que les champs des deux aimants ont également la même forme.

## Exercices

- La Fig. 2.14a montre les extrémités de deux aimants droits. Les deux autres extrémités sont situées au-delà du dessin, à une grande distance. (a) Esquissez (avec des couleurs différentes) les lignes de magnétisation, les lignes de champ et les surfaces de champ. (b) Comment peut-on lire sur l'image du champ que les deux aimants s'attirent ?
- La Fig. 2.14b montre les extrémités de deux aimants droits. Les deux autres extrémités sont situées au-delà du dessin, à une grande distance. (a) Esquissez (avec des couleurs différentes) les lignes de magnétisation, les lignes de champ et les surfaces de champ. (b) Comment peut-on lire sur l'image du champ que les deux aimants se repoussent ?
- La Fig. 2.15 montre un aimant quelque peu étrange. Il a la forme d'une sphère creuse. La surface extérieure porte une charge magnétique positive, la surface intérieure porte la même quantité de charge négative. Dessinez les lignes de magnétisation, les lignes de champ et les surfaces de champ dans des couleurs différentes. Comment est le champ magnétique au-delà de la sphère et comment est-il dans l'espace interne creux ?
- Un aimant est en forme d'anneau comme celui de la Fig. 2.12, mais cette fois sans entrefer. Les lignes de magnétisation suivent cette forme d'anneau. Que peut-on dire des pôles magnétiques et qu'en est-il des lignes de champ magnétique et des surfaces de champ ?

## 2.6 Matériaux magnétiques doux

Un aimant n'attire pas seulement un autre aimant, mais aussi des corps constitués de certains autres matériaux, les *matériaux magnétiquement doux* ou *matériaux magnétiques doux*. Les matériaux dont sont constitués les



aimants permanents, que nous avons analysés dans les sections précédentes, sont appelés matériaux magnétiques durs. Tout comme les matériaux magnétiques durs, les matériaux magnétiques doux sont constitués d'atomes magnétiques. Alors que l'alignement des aimants atomiques des matériaux magnétiques durs ne change pas dans des circonstances normales, les aimants atomiques des matériaux magnétiques doux peuvent être facilement tournés. Un matériau magnétique doux typique est le « fer doux ». (Il existe différents types de fer, selon les autres substances qui ont été ajoutées pour en faire un alliage).

Dans les matériaux magnétiques doux, les aimants atomiques sont orientés sans aucune régularité au départ, de sorte qu'il n'y a pas de charge nette à la surface. Toutefois, si un corps magnétique doux est placé dans un champ magnétique, les aimants atomiques s'alignent. Cela signifie que l'intérieur du corps est magnétisé et que la surface est chargée magnétiquement. Si le corps magnétique doux est retiré du champ, les aimants atomiques se brouillent à nouveau. Il perd sa magnétisation et la charge magnétique disparaît.

Ce comportement est similaire à celui des métaux qui sont placés dans un champ électrique. Dans ce cas, des zones chargées électriquement se développent à la surface, alors que la charge globale du corps reste nulle. Nous avons appelé ce phénomène l'induction électrostatique. Le phénomène magnétique correspondant est appelé induction magnétostatique.

De même qu'aucun champ électrique ne peut être maintenu à l'intérieur d'un métal, aucun champ magnétique ne peut exister dans un matériau magnétique doux. Et tout comme les lignes de champ électrique sortent et rentrent perpendiculairement dans les surfaces métalliques, les lignes de champ magnétique sortent et rentrent perpendiculairement dans les corps magnétiques doux. La Fig. 2.16 montre un morceau de

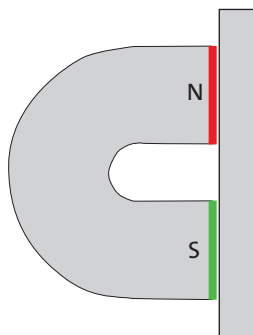


Fig. 2.16 Quel est le parcours des lignes de magnétisation dans l'aimant en fer à cheval et dans le corps en fer doux ?

fer doux placé à proximité d'un aimant en fer à cheval. Quel est le parcours des lignes de magnétisation dans l'aimant en fer à cheval et dans le corps en fer doux ?

Les corps magnétiquement doux sont magnétisés lorsqu'ils sont placés dans un champ magnétique. Des zones magnétiquement chargées se développent à leur surface. Le champ magnétique est déplacé depuis leur intérieur vers leur extérieur. Les lignes de champ magnétique à l'extérieur du corps partent et se terminent perpendiculairement à la surface.

### Exercices

1. Une plaque faite d'un matériau magnétique doux est placée entre les pôles d'un aimant, Fig. 2.17. Dessinez les surfaces de champ et les lignes de champ. Quelles contraintes mécaniques existent dans la plaque métallique : compression ou tension ? Quelle est leur direction ?
2. Vous avez probablement un aimant qui ressemble à celui de la Fig. 2.18 dans votre équipement scolaire. Il se compose d'un aimant droit et de deux parties en fer doux. Où se forment les pôles magnétiques dans le fer doux ? Quel est le tracé des lignes de magnétisation ? Quel est le tracé des lignes de champ ? Quel est l'avantage de l'aimant ? Quel est son inconvénient ?

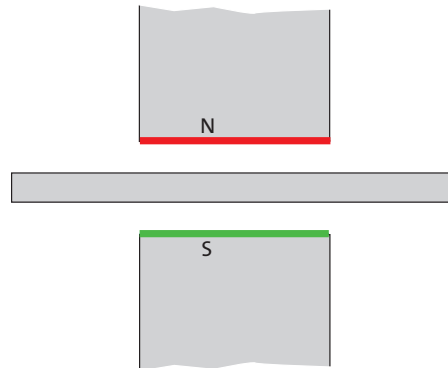


Fig. 2.17 Pour l'exercice 1

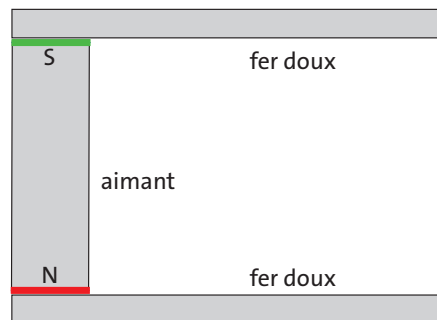


Fig. 2.18 Pour l'exercice 2



## 2.7 Courant électrique et champ magnétique

Un long fil est suspendu comme indiqué sur la Fig. 2.19. Le fil peut être relié à une batterie de voiture de façon à ce qu'un courant électrique puisse y circuler : dans la partie droite vers le bas et dans la partie gauche vers le haut. Le circuit électrique ne peut être fermé que pour une courte durée car la résistance du fil est très faible et un courant de plus de 50 A y circule. En fermant l'interrupteur, nous allons observer les parties du câble qui pendent. Les fils s'écartent. Quelque chose les a éloignés l'un de l'autre.

Nous répétons l'expérience, mais cette fois-ci en disposant le fil de manière à ce que le courant électrique circule dans le même sens dans les deux sections de fil verticales les plus proches (Fig. 2.20). Cette fois, les sections de fil se rapprochent l'une de l'autre lorsque le circuit électrique est fermé.

Quel est le phénomène par lequel un fil tire ou pousse l'autre ? La réponse est facile à trouver. Nous plaçons une aiguille de boussole à proximité d'un fil

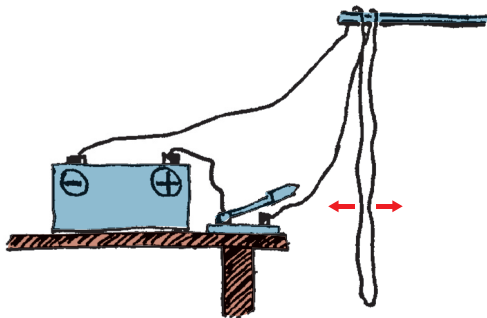


Fig. 2.19 Lorsque le circuit électrique est fermé, les fils s'écartent.

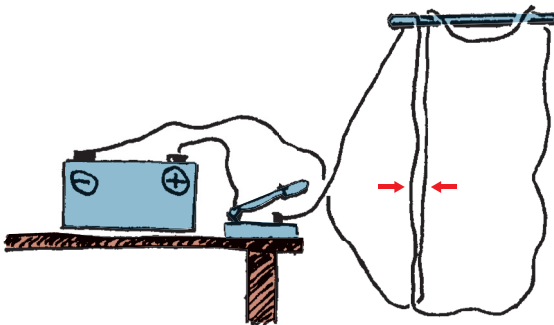


Fig. 2.20 Lorsque le circuit électrique est fermé, les fils se rapprochent l'un de l'autre.

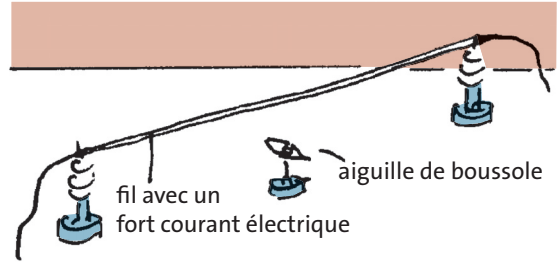


Fig. 2.21 Lorsque le courant électrique est mis en marche, l'aiguille de la boussole change de direction.

dans lequel peut circuler un fort courant électrique. Dès que le courant électrique circule, l'aiguille de la boussole s'oriente dans une certaine direction, Fig. 2.21. Lorsque le circuit électrique est à nouveau interrompu, l'aiguille oscille à nouveau dans sa direction initiale. A l'évidence, le fil est entouré d'un champ magnétique dès qu'un courant électrique y circule.

L'aiguille de la boussole, ou la limaille de fer, peut être utilisée pour déterminer la direction des lignes de champ et donc aussi des surfaces de champ : pour un fil unique, les lignes de champ sont circulaires. Elles entourent le fil de manière à ce que le centre du cercle soit situé dans le fil. Elles n'ont donc ni point de départ ni point d'arrivée, contrairement aux lignes de champ d'un aimant permanent.

Les surfaces de champ sont des plans qui se terminent dans le fil, Fig. 2.22.

La Fig. 2.23 montre une section du champ perpendiculaire à la direction du fil. (Un courant électrique qui

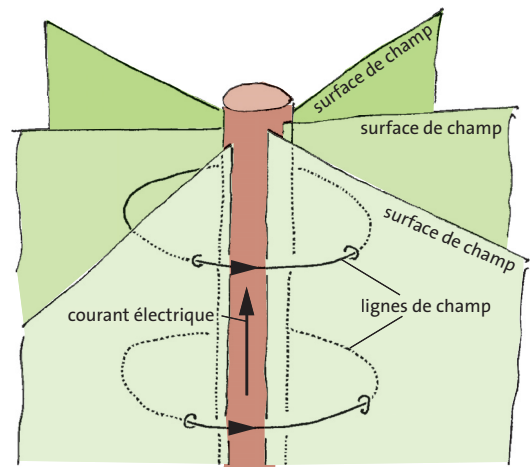
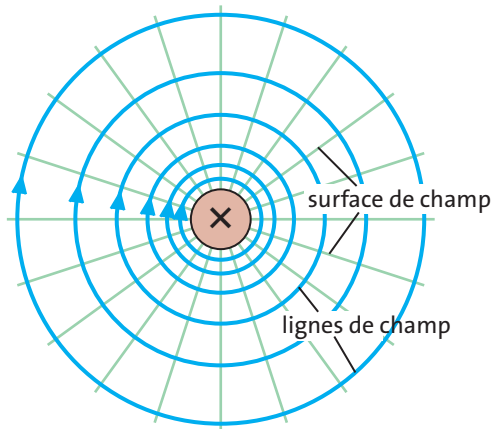
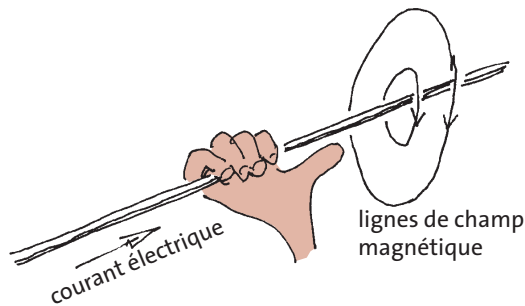


Fig. 2.22 Vue en perspective des surfaces de champ et des lignes de champ du champ magnétique d'un fil dans lequel circule un courant électrique.



**Fig. 2.23** Coupe transversale du fil et du champ de la Fig. 2.22. La croix dans le fil signifie que le courant circule vers l'intérieur du plan du dessin.



**Fig. 2.24** Lorsque le pouce de la main droite a la direction du courant électrique, les autres doigts pointent dans la direction de l'intensité du champ magnétique.

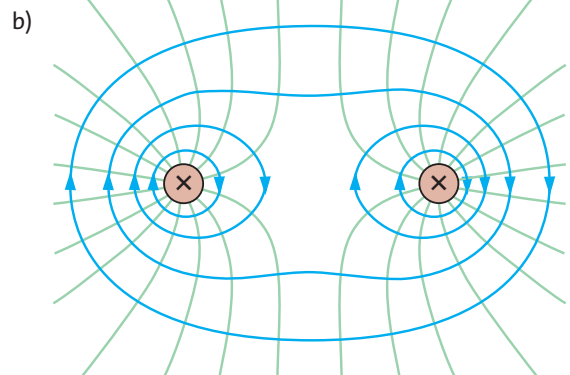
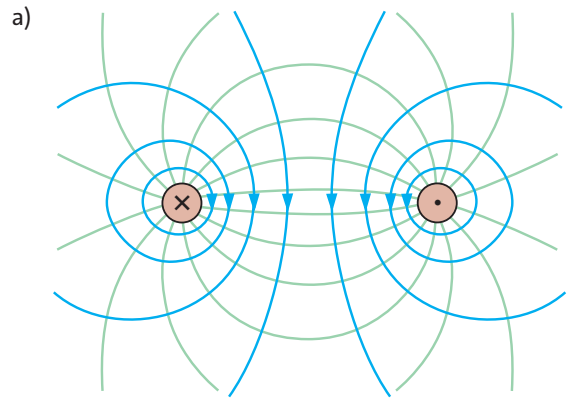
entre dans le plan de l'image en s'éloignant du lecteur est marqué par une croix ; un courant qui sort du plan de l'image vers le lecteur est marqué par un point).

Chaque courant électrique est entouré d'un champ magnétique. Les lignes de champ entourent le courant. Les surfaces de champ se terminent sur le courant.

Du fait que les surfaces de champ arrivent radialement sur le fil, et comme nous le verrons à la section 2.10, nous pouvons conclure que le champ comprime le fil.

Une règle simple peut être formulée pour le sens des vecteurs des lignes de champ, Fig. 2.24. Enroulez les doigts de votre main droite autour du conducteur de manière à ce que le pouce pointe dans la direction du courant électrique. Alors, les doigts pointent dans la direction du vecteur intensité du champ magnétique.

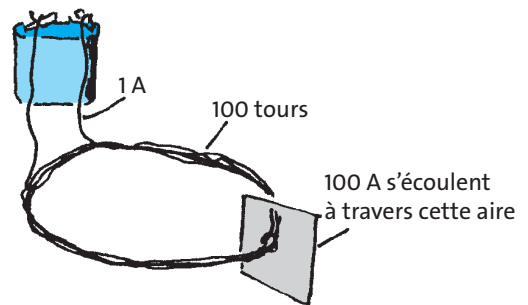
La Fig. 2.25a montre le champ de deux fils dans lesquels le courant électrique circule dans des directions



**Fig. 2.25** Surfaces et lignes du champ de deux fils parallèles. (a) Les courants circulent dans des directions opposées. (b) Les courants circulent dans le même sens.

opposées. Dans la Fig. 2.25b, le courant électrique circule dans le même sens.

Le champ magnétique généré par les courants électriques peut être rendu beaucoup plus dense grâce à une astuce simple : le même fil est amené plusieurs fois au même endroit, ou mieux, il est enroulé pour former une bobine. Dans la Fig. 2.26, le fil est enroulé 100 fois



**Fig. 2.26** Le champ d'un faisceau de fils est aussi dense que celui d'un fil dans lequel circule un courant de 100 A.

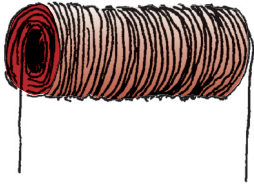


Fig. 2.27 Bobine cylindrique

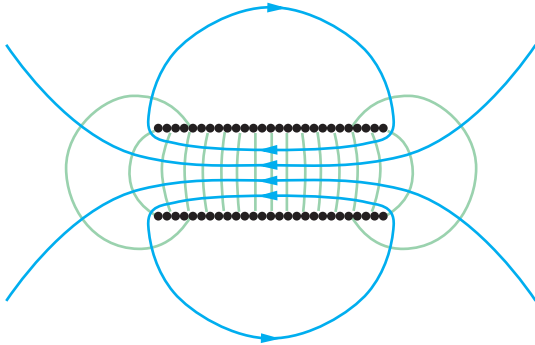


Fig. 2.28 Surfaces et lignes de champ du champ magnétique d'une bobine cylindrique

en forme de cercle. Lorsqu'un courant de 1 A circule dans le fil, un courant global de 100 A circule dans la section indiquée dans la figure. Par conséquent, il y a un champ magnétique autour de ce faisceau de fils qui est aussi dense que celui d'un seul fil dans lequel circule un courant électrique de 100 A.

Une bobine cylindrique offre un arrangement très utile. Ici, le fil est enroulé en plusieurs couches, Fig. 2.27. (Bien sûr, le fil doit être isolé car, sinon, le courant pourrait emprunter un chemin plus court).

La Fig. 2.28 montre une coupe transversale du champ d'une bobine. Il est principalement situé à l'intérieur de la bobine et est presque homogène (tout comme le champ du condensateur est principalement situé entre les plaques où il est homogène). Les lignes de champ sont parallèles à l'axe de la bobine.

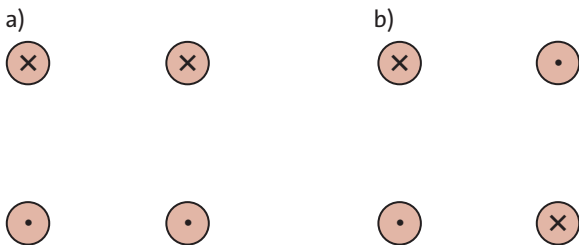


Fig. 2.29 (a) Pour l'exercice 2 ;  
(b) Pour l'exercice 3

Exercices

1. Un tuyau de cuivre est utilisé comme conducteur électrique, le courant électrique circulant dans la direction longitudinale. Dessinez une image en coupe transversale du tuyau et esquissez les lignes de champ et les surfaces de champ du champ magnétique à l'extérieur du tuyau. Essayez de dessiner les lignes et les surfaces de champ à l'intérieur du tuyau. Que pouvez-vous dire en conclusion ? Quelles sont les contraintes de compression et de traction « ressenties par le tuyau » ?
2. Des courants électriques de même amplitude mais pas de même sens circulent dans quatre fils parallèles, Fig. 2.29a. Esquissez les surfaces de champ et les lignes de champ.
3. Des courants électriques de même amplitude mais de directions différentes circulent dans quatre fils parallèles, Fig. 2.29b. Esquissez les surfaces de champ et les lignes de champ.

## 2.8 Calcul de l'intensité du champ magnétique

L'intensité du champ magnétique est un vecteur. Elle suit les mêmes règles que l'intensité du champ électrique. Si un courant électrique  $I_1$  pris seul crée un champ magnétique d'intensité  $\vec{H}_1$  en un point P, et si un autre courant  $I_2$ , également pris seul, crée un champ d'intensité  $\vec{H}_2$  en ce même point P, les deux courants ensemble créeront un champ d'intensité

$$\vec{H} = \vec{H}_1 + \vec{H}_2.$$

Par analogie avec le champ électrique, la règle suivante s'applique :

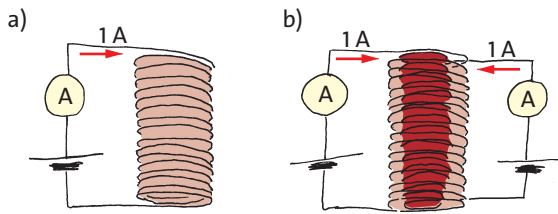
Si tous les courants électriques sont multipliés par un facteur  $k$ , les valeurs de toutes les intensités de champ magnétique augmenteront du même facteur  $k$ . Les directions des champs restent égales.

Nous avons besoin de ces règles pour calculer l'intensité du champ magnétique dans une bobine. Nous savons que le champ est homogène et que le vecteur intensité de champ a la même direction que l'axe de la bobine. Nous admettrons que l'intensité du champ est proportionnelle au courant électrique. Par conséquent, nous pouvons dire :

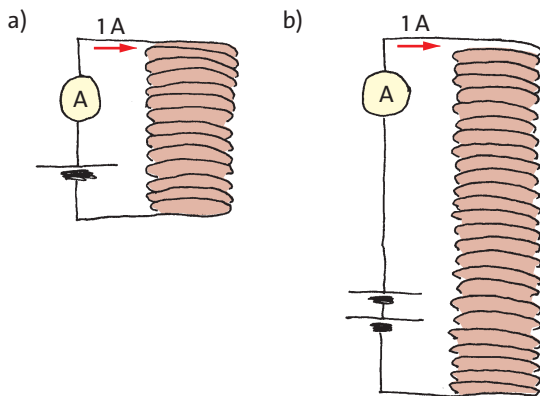
$$|\vec{H}| \sim I.$$

Mais il doit y avoir plus que cela. Ce n'est pas le courant seul dans un fil qui est responsable du champ, mais plu-

## Calcul de l'intensité du champ magnétique



**Fig. 2.30** (a) Bobine de 200 tours traversée par un courant de 1 A. (b) Une bobine de 400 tours traversée par un courant de 1 A est équivalente à deux bobines enroulées l'une sur l'autre, chacune ayant 200 tours. L'intensité du champ magnétique est deux fois plus élevée.



**Fig. 2.31** (a) Bobine avec 200 tours, le courant est de 1 A. (b) Bobine deux fois plus longue avec 400 tours, le courant est de 1 A. La bobine est équivalente à deux bobines adjacentes de 200 tours chacune. L'intensité du champ est la même que dans la bobine de (a).

tôt le courant total qui circule à l'intérieur de la bobine. En termes de courant total  $I_t$ , nous obtenons :

$$I_t = n \cdot I$$

( $n$  = nombre de tours de la bobine). Si le nombre de spires est doublé alors que le reste de la bobine est laissé tel quel, l'intensité du champ à l'intérieur de la bobine doit également doubler, Fig. 2.30.

C'est comme si deux bobines avaient été glissées l'une sur l'autre. Par conséquent, nous complétons notre relation de proportionnalité pour obtenir :

$$|\vec{H}| \sim I_t = n \cdot I.$$

Mais cette relation n'est pas encore complète. La Fig. 2.31 montre deux bobines qui diffèrent l'une de l'autre par leur longueur  $l$  : la seconde est deux fois plus longue que la première.

Un courant de 1 A circule dans le fil de chaque bobine. L'intensité globale du courant dans la première bobine est donc de

$$I_t = 1 \text{ A} \cdot 200 = 200 \text{ A}$$

et de

$$I_t = 1 \text{ A} \cdot 400 = 400 \text{ A.}$$

dans la seconde bobine.

La deuxième bobine, cependant, peut être considérée comme équivalente à deux bobines adjacentes traversées par des courants totaux de 200 ampères chacun. Dans chacune des bobines individuelles, nous avons la même intensité de champ que dans la bobine unique à gauche de l'image.

Une comparaison entre la bobine courte de gauche et la bobine longue de droite montre que le quotient de l'intensité du courant global et de la longueur de la bobine  $l$

$$I_t/l = n \cdot I/l,$$

à gauche et à droite est égal. Par conséquent, ce qui importe pour l'intensité du champ est le quotient du courant total par la longueur  $l$ , ou le nombre de tours multiplié par le courant divisé par la longueur de la bobine :

$$|\vec{H}| \sim \frac{I_t}{l} = \frac{n \cdot I}{l}.$$

L'unité de mesure de la charge magnétique a été choisie de telle sorte que l'équation contient un signe égal au lieu d'un signe de proportionnalité.

Intensité du champ magnétique de la bobine :

$$|\vec{H}| = \frac{I_t}{l} = \frac{n \cdot I}{l}. \quad (2.3)$$

Comparez cette formule avec l'équation (1.3) pour l'intensité du champ électrique dans le condensateur.

### Exemple

Un courant électrique de 4 A circule dans une bobine de 1500 tours et d'une longueur de 30 cm. Quelle est l'intensité du champ magnétique à l'intérieur de la bobine ?

$$|\vec{H}| = \frac{n \cdot I}{l} = \frac{1500 \cdot 4 \text{ A}}{0,3 \text{ m}} = 20000 \text{ A/m.}$$

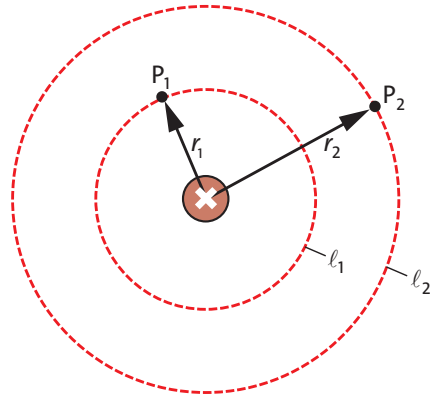
Le calcul de l'intensité du champ pour d'autres conducteurs électriques est généralement plus compliqué que pour une bobine. Mais il existe encore un autre cas dans lequel l'intensité du champ peut être calculée facilement : le champ d'un long fil droit.

Champ magnétique autour d'un fil droit

$$|\vec{H}| = \frac{I}{l}$$

$l$  = circonférence du cercle

Ici,  $I$  est le courant dans le fil et  $l$  est la circonférence du cercle sur lequel se trouve le point pour lequel l'intensité du champ doit être calculée, Fig. 2.32. Vous voyez que la formule est très similaire à celle de la bobine. Mais gardez à l'esprit les différentes significations de  $l$  dans les deux cas.



$$H_1 = \frac{I}{l_1} = \frac{I}{2\pi r_1}$$

$$H_2 = \frac{I}{l_2} = \frac{I}{2\pi r_2}$$

Fig. 2.32 Pour calculer les intensités de champ magnétique  $H_1$  et  $H_2$  aux points  $P_1$  et  $P_2$  autour d'un fil droit

**Exercices**

1. Comparez l'équation (2.3) avec l'équation (1.3). Pourquoi l'équation (1.3) ne contient-elle pas l'aire des plaques du condensateur ? Pourquoi l'équation (2.3) ne contient-elle pas l'aire de la section transversale de la bobine ?
2. Une bobine d'une longueur de 60 cm est composée de 3000 tours. Un courant électrique de 0,8 A circule dans la bobine. Quelle est l'intensité du champ magnétique à l'intérieur de la bobine ?
3. Vous trouvez une bobine et vous aimeriez connaître le nombre de ses spires. La bobine a une longueur de 15 cm. Vous envoyez un courant électrique de 500 mA à travers elle et vous mesurez une intensité de champ de 3000 A/m à l'intérieur avec le mesureur de champ magnétique.
4. Une bobine en forme de tore (un cylindre qui a été plié pour former un anneau en forme de pneu) a 1000 tours. Le diamètre de l'anneau est de 0,5 m. Un courant électrique de 2,5 A circule dans la bobine. (a) Dessinez les lignes de champ et les surfaces de champ. (b) Quelle est l'intensité du champ à l'intérieur de la bobine ?
5. Un courant électrique de 16 A circule dans un fil d'un diamètre de 2 mm. (a) Quelle est l'intensité du champ magnétique à sa surface ? (b) Quelle est l'intensité du champ magnétique à une distance de 1 cm du centre du fil ?
6. Un câble coaxial est constitué d'un cylindre métallique creux et flexible et d'un fil situé sur l'axe du cylindre. Le cylindre et le fil sont isolés électriquement l'un de l'autre. Ils forment la ligne aller et la ligne retour du câble. Un courant de 0,5 A circule dans un tel câble (c'est-à-dire dans le fil dans un sens, dans le cylindre dans l'autre). Le diamètre extérieur du câble est de 10 mm, le diamètre du fil de 1 mm.
  - (a) Quelle est l'intensité du champ magnétique à l'extérieur du câble ?
  - (b) Quelle est l'intensité du champ magnétique à la surface du fil ?

## 2.9 Mesurer la charge magnétique

Nous souhaitons mesurer la charge magnétique d'un pôle magnétique d'un aimant droit.

Nous transformons notre équation bien connue

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{Q_m}$$

et nous obtenons

$$Q_m = \frac{F}{H} \tag{2.4}$$

Pour déterminer  $F$ , nous suspendons l'aimant à un dynamomètre (dispositif mesurant le courant de quantité de mouvement) de sorte que l'un des pôles soit situé complètement à l'intérieur d'une bobine tandis que l'autre est situé aussi loin à l'extérieur que sa contribution au champ à l'intérieur de la bobine peut être négligée, Fig. 2.33. Maintenant, nous faisons passer un courant électrique à travers la bobine et nous vérifions de combien le courant de quantité de mouvement augmente. L'augmentation correspond au courant de quantité de mouvement qui passe de la bobine au pôle magnétique en passant par le champ.

Il ne nous reste plus qu'à calculer l'intensité du champ magnétique  $H$  dans la bobine et à obtenir la charge magnétique à l'aide de l'équation (2.4).

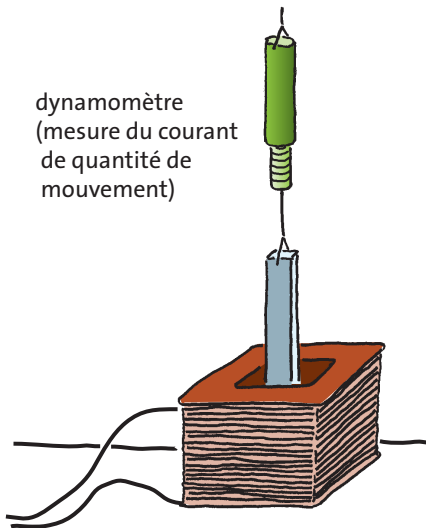


Fig. 2.33 Mesure de la charge magnétique d'un pôle magnétique

**Exemple**

- Longueur de la bobine :  $l = 8 \text{ cm}$
- Nombre de tours :  $n = 500$
- Courant électrique (mesuré) :  $1,2 \text{ A}$
- Courant de quantité de mouvement :  $0,15 \text{ N}$

Intensité du champ magnétique dans la bobine :

$$H = \frac{n \cdot I}{l} = \frac{500 \cdot 1,2 \text{ A}}{0,08 \text{ m}} = 7500 \text{ A/m}$$

Charge du pôle magnétique :

$$Q_m = \frac{F}{H} = \frac{0,15 \text{ N}}{7500 \text{ A/m}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Wb}$$

Cette expérience peut également être utilisée pour confirmer que la charge magnétique globale d'un aimant est égale à zéro : un aimant est suspendu de manière à ce que ce soit l'autre pôle qui est situé à l'intérieur de la bobine et nous faisons circuler le courant électrique dans le sens opposé. Nous trouvons la même valeur pour le courant de quantité de mouvement que dans la première expérience.

Nous pouvons également suspendre un aimant plus petit au dynamomètre de manière à ce que l'aimant soit entièrement situé à l'intérieur de la bobine. Le courant de quantité de mouvement est alors égal à zéro.

Juste pour le plaisir, nous aimerions examiner une autre variante de l'expérience : nous plaçons la bobine sur une balance (si possible, sur une balance dont le plateau ne bouge pas pendant la pesée, par exemple la balance analytique du laboratoire de chimie) et allu-

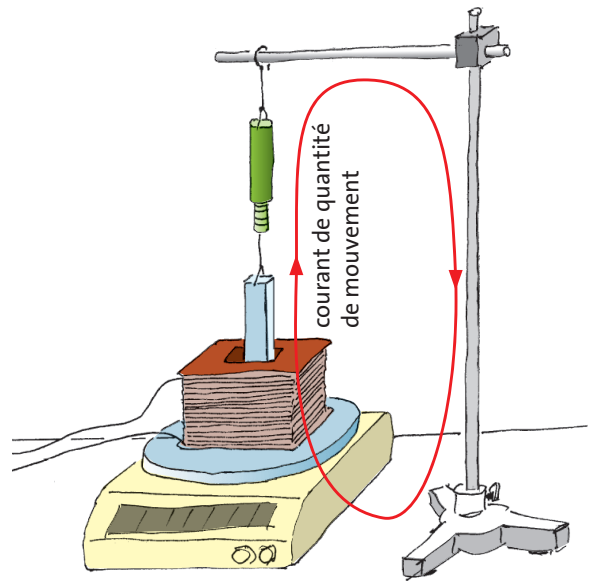


Fig. 2.34 Le courant de quantité de mouvement est mesuré à deux endroits : à l'un avec un dynamomètre et à l'autre avec une balance analytique.

mons à nouveau le courant électrique dans la bobine, Fig. 2.34.

Un courant de quantité de mouvement circule maintenant de la table en passant par la bobine, le champ magnétique, l'aimant, le dynamomètre du haut et sa suspension et revient vers la table. Comme la balance n'est rien d'autre qu'un compteur de courant de quantité de mouvement, le même courant de quantité de mouvement circule successivement dans deux compteurs. Bien entendu, les deux indiquent la même valeur. (Pour lire le courant de quantité de mouvement sur la balance, la valeur indiquée doit être multipliée par l'intensité du champ gravitationnel car la balance est calibrée en unités de masse).

## 2.10 Contraintes de compression et de traction au sein du champ magnétique

Tout comme pour le champ électrique, il y a des contraintes mécaniques dans le champ magnétique. Dans la direction du vecteur d'intensité du champ, le champ est associé à une contrainte de traction, et dans la direction perpendiculaire, il est associé à une contrainte de compression. Ces contraintes sont utilisées pour de nombreuses applications techniques et



interviennent également dans les phénomènes naturels.

Les valeurs des contraintes (= densités de courant de quantité de mouvement) sont calculées à l'aide de formules qui ont la même structure que celles pour le champ électrique.

$$\text{Champ magnétique : } \sigma_{\parallel} = -\frac{\mu_0}{2} |\vec{H}|^2 \quad \sigma_{\perp} = \frac{\mu_0}{2} |\vec{H}|^2$$

$\sigma_{\parallel}$  est à nouveau la contrainte dans la direction des lignes de champ ; elle est négative (contrainte de traction).  $\sigma_{\perp}$  est la contrainte perpendiculaire aux lignes de champ ; elle est positive (contrainte de compression).  $|\vec{H}|$  est la norme de l'intensité du champ magnétique.  $\mu_0$  est la *constante magnétique* :

$$\text{Constante magnétique : } \mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Wb/(A}\cdot\text{m)}$$

Nous pouvons maintenant comprendre pourquoi et comment les corps magnétisés s'attirent ou se repoussent. Encore une fois, nous aimerions prédire, en regardant simplement l'image du champ, dans quelle direction le champ pousse ou tire les corps.

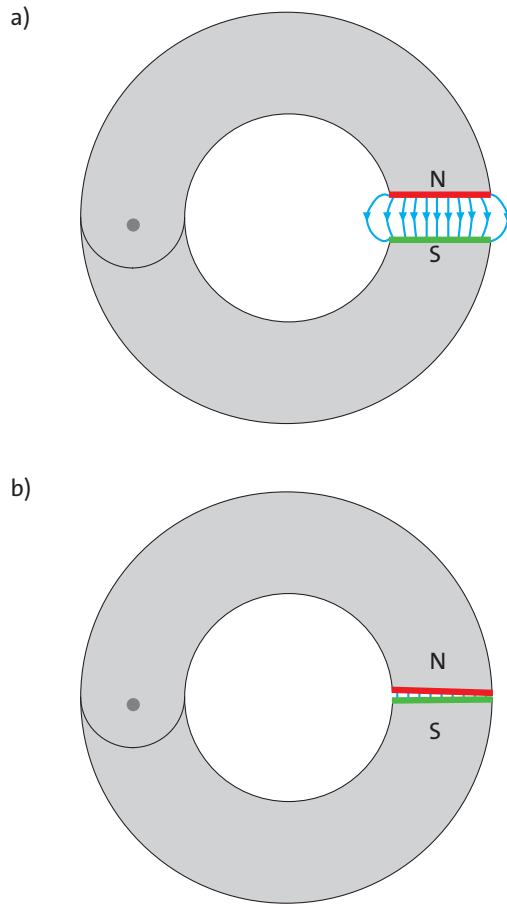
### 1. L'aimant en anneau

La Fig. 2.12 montre une image du champ. Les lignes de champ joignent le pôle inférieur au pôle supérieur selon une direction pratiquement verticale. Comme il y a une contrainte de traction dans la direction des lignes de champ et que les lignes de champ se terminent sur la surface du pôle, le champ tire le pôle supérieur vers le bas. Sur le pôle inférieur, il le tire vers le haut de la même façon. Un anneau avec un pivot, Fig. 2.35a, ne serait pas stable ; il se fermerait, Fig. 2.35b.

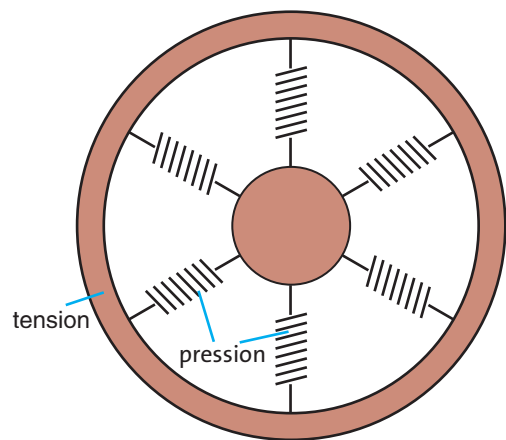
### 2. Le fil unique

La Fig. 2.23 montre les lignes de champ et les surfaces de champ d'un fil dans lequel circule un courant électrique. Les surfaces de champ se fondent de tous côtés dans le fil où elles se terminent. Par conséquent, le champ comprime le fil de l'extérieur. Ceci est similaire au champ électrique d'une sphère chargée, Fig. 1.47. Lorsque le champ pousse vers l'intérieur, il doit également pousser vers l'extérieur. Où adhère-t-il à l'extérieur ? Là encore, la réponse peut être trouvée en observant un modèle matériel du champ, Fig. 2.36.

Tout comme le champ, les ressorts radiaux sont soumis à une contrainte de compression. Ils adhèrent à l'anneau par l'extérieur. Par conséquent, l'anneau est



**Fig. 2.35** Aimant en anneau avec un jeu et avec un pivot. (a) Dans cette position, l'aimant n'est pas stable ; (b) il se ferme dans une nouvelle position.



**Fig. 2.36** Modèle du champ magnétique d'un fil dans lequel circule un courant électrique. Les ressorts poussent sur le fil vers l'intérieur et sur l'anneau vers l'extérieur. L'anneau est donc soumis à une contrainte de traction.



## Contraintes de compression et de traction au sein du champ magnétique

soumis à une contrainte de traction. Il en va de même pour notre champ : le champ est également soumis à une contrainte de traction dans la direction des cercles concentriques, c'est-à-dire dans la direction des lignes de champ.

Pour un conducteur électrique typique constitué d'un matériau solide comme le cuivre, avec un courant électrique typique, par exemple de 20 A, la pression du champ magnétique est à peine perceptible (voir aussi l'exercice 1).

Par contre, si un courant électrique très fort circule dans un conducteur liquide ou dans un conducteur gazeux (un plasma), la pression peut avoir des effets importants.

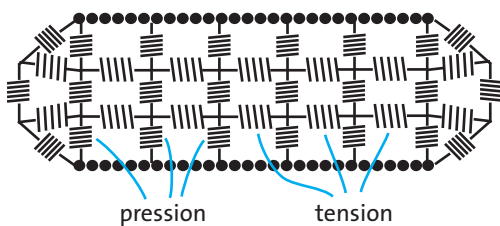
Dans un réacteur de fusion nucléaire, appelé Tokamak, un plasma doit être maintenu dans un récipient en forme de tore à une température d'environ 100 millions de kelvins. Le plasma ne doit pas entrer en contact avec les parois du récipient. On veille donc à ce qu'un fort courant électrique circule dans le gaz. Son champ magnétique pousse de l'extérieur sur le plasma et maintient sa cohésion. Ainsi, le gaz est confiné dans le champ magnétique.

### 3. La bobine

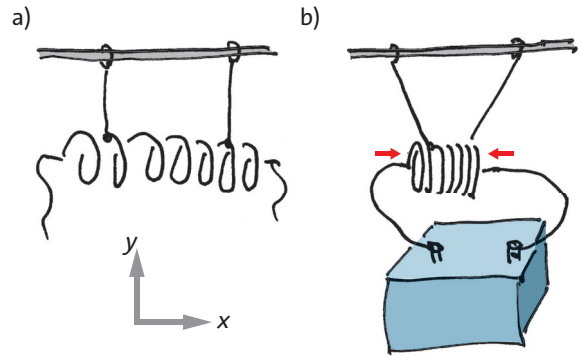
Son champ est représenté sur la Fig. 2.28. Quels sont les effets de la contrainte de compression et de traction sur la bobine ? Que ressent la bobine ? Une fois encore, nous examinons un modèle matériel, Fig. 2.37.

Les ressorts qui sont perpendiculaires à l'axe de la bobine (vertical sur la figure), sont comprimés. Ils poussent sur les fils de la bobine depuis l'intérieur. Si la bobine était faite d'un matériau très mou, les spires individuelles se dilateraient.

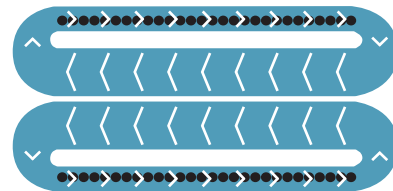
Les ressorts horizontaux, qui sont soumis à une contrainte de traction, sont fixés chacun aux extrémités de deux ressorts inclinés qui poussent de l'extérieur sur les extrémités de la bobine. Ainsi, la bobine est soumise à une contrainte de compression dans le sens



**Fig. 2.37** Modèle du champ magnétique d'une bobine. Les ressorts poussent sur les fils individuels à partir de l'intérieur de la bobine et poussent sur la bobine à partir des côtés dans le sens longitudinal.



**Fig. 2.38** (a) Bobine élastique faiblement enroulée. (b) La bobine est brièvement connectée à une batterie de voiture. Elle est immédiatement comprimée par le champ.



**Fig. 2.39** Le courant de quantité de mouvement selon x circule dans le champ à l'intérieur de la bobine de la droite vers la gauche et à travers le matériau de la bobine vers la droite.

longitudinal. En fait, une bobine faiblement torsadée est comprimée par le champ lorsqu'un courant fort circule, Fig. 2.38.

Le courant de quantité de mouvement selon x circule à l'intérieur de la bobine de la droite vers la gauche (contrainte de traction). Il se ramifie à l'extrémité gauche de la bobine et traverse le matériau de la bobine pour revenir vers la droite (contrainte de compression), puis vers le champ, Fig. 2.39.

Nous pouvons calculer le courant de quantité de mouvement correspondant. Supposons que les valeurs suivantes soient connues :

- Longueur de la bobine :  $l = 40$  cm
- Aire de la section transversale de la bobine :  $A = 100$  cm<sup>2</sup>
- Nombre de spires :  $n = 50$
- Courant électrique :  $I = 120$  A

Nous examinons d'abord l'intensité du champ magnétique :

$$|\vec{H}| = \frac{n \cdot I}{l} = \frac{50 \cdot 120 \text{ A}}{0,4 \text{ m}} = 15000 \text{ A/m}$$

Nous obtenons ainsi la contrainte de traction à l'intérieur de la bobine :

$$\begin{aligned} \sigma_{\parallel} &= -\frac{\mu_0}{2} |\vec{H}|^2 \\ &= -\frac{1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}/(\text{A} \cdot \text{m})}{2} \cdot (15000 \text{ A/m})^2 \\ &= -141 \text{ Pa} \end{aligned}$$

et enfin le courant de quantité de mouvement :

$$F = \sigma_{\parallel} \cdot A = -141 \text{ Pa} \cdot 0,01 \text{ m}^2 = -1,41 \text{ N}$$

### Exercices

1. Un fil de cuivre a une section transversale de 1,5 mm<sup>2</sup>. Un courant électrique de 16 A circule dans le fil. Quelle est la pression du champ magnétique sur la surface du fil ?
2. Un éclair est constitué d'air ionisé (c'est-à-dire un plasma) à travers lequel un fort courant électrique circule de la Terre vers le nuage d'orage. Un éclair typique a un diamètre de 1 cm, le courant électrique est de 10000 A. (a) Quelle est la pression du champ magnétique à la surface du plasma ? (b) Le plasma a une température de 10000 K. Il est chauffé si rapidement qu'il n'a pas le temps de se dilater au début. Quelle est la pression du gaz généré au cours du processus ? Comparez avec le résultat de la partie (a).
3. Comme nous le savons, deux fils parallèles, dans lesquels des courants électriques circulent dans des directions opposées, se repoussent du fait du champ magnétique, Fig. 2.19. Comment peut-on voir cela dans l'image du champ de la Fig. 2.25a ?
4. Deux fils parallèles, dans lesquels les courants électriques circulent dans la même direction, sont rapprochés l'un de l'autre par le champ magnétique, Fig. 2.20. Comment peut-on le voir sur l'image du champ de la Fig. 2.25b ?

## 2.11 Electroaimants

On se souvient que les matériaux magnétiques doux, par exemple le fer doux, déplacent le champ magnétique vers l'extérieur. Ce faisant, le fer doux est magnétisé et des pôles magnétiques se développent à sa surface. Si l'intérieur d'une bobine, c'est-à-dire la zone où se trouve la plus grande partie du champ de la bobine, est rempli de fer doux, le champ sera rejeté hors de cette zone. Il sera alors situé à l'extérieur de la bobine, aux extrémités, Fig. 2.40. Une telle bobine avec un noyau en fer doux est appelée électro-aimant.

Les pôles sont situés aux extrémités du noyau de fer doux. Par rapport à la bobine, l'électro-aimant présente l'avantage que le champ magnétique n'est plus caché à l'intérieur, mais situé à un endroit facilement accessible. Contrairement à l'aimant permanent, il

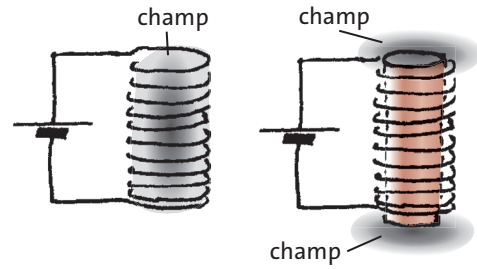


Fig. 2.40 Le champ magnétique est déplacé de la bobine par le noyau de fer doux.

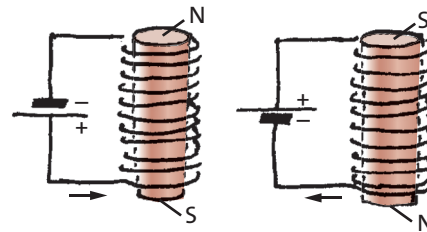


Fig. 2.41 Si le sens du courant électrique dans la bobine est inversé, les pôles magnétiques changent de position.

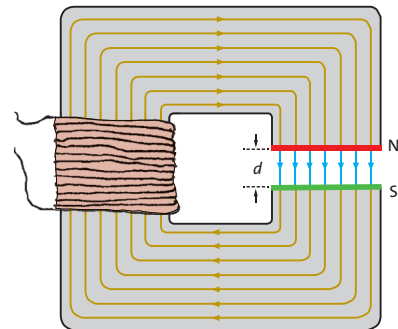


Fig. 2.42 Electro-aimant en forme d'anneau

peut être allumé et éteint, réglé sur une force faible ou élevée et sa polarité peut être inversée. Sur la Fig. 2.41, on peut voir sur quelle extrémité se forme le pôle magnétique positif et sur quelle extrémité se forme le pôle magnétique négatif.

La Fig. 2.42 montre une variante particulièrement intéressante d'un électro-aimant : le noyau de fer est en forme d'anneau et comporte un espace libre (cet espace, ou jeu, est appelé « entrefer »). Si la largeur  $d$  de l'entrefer est faible par rapport à l'extension latérale de la surface de l'entrefer, le champ est essentiellement limité à l'espace de l'entrefer et il est presque homogène. Les pôles sont situés sur la surface de l'entrefer. Par conséquent, le champ est similaire au champ électrique d'un condensateur.

La figure montre à la fois les lignes de magnétisation et les lignes de champ. On se souvient de la règle selon laquelle les lignes de champ commencent là où finissent les lignes de magnétisation, et les lignes de magnétisation commencent là où finissent les lignes de champ.

De manière surprenante, nous pouvons à nouveau utiliser notre ancienne formule pour calculer l'intensité du champ :

$$|\vec{H}| = \frac{n \cdot I}{d}$$

Cependant, au lieu de la longueur  $l$  de la bobine, c'est la largeur  $d$  de l'entrefer qui est dans le dénominateur. Nous pouvons constater que cet électro-aimant possède une propriété intéressante : l'intensité du champ augmente en réduisant l'entrefer.

Les électro-aimants sont utilisés de nombreuses manières différentes. La plus importante est probablement le moteur électrique.

### Exercices

1. Nommez des appareils qui contiennent des électro-aimants. Comment ces appareils fonctionnent-ils ?
2. Inventez un moteur
3. Un électro-aimant avec un entrefer (comme sur la Fig. 2.42) doit avoir les dimensions suivantes : largeur de l'entrefer 1 cm, aire de la section transversale du noyau de fer  $100 \text{ cm}^2$ . La bobine de l'aimant doit avoir 1000 tours et le courant électrique doit être de 2 A. (a) Calculez l'intensité du champ magnétique dans l'entrefer. (b) Quelle quantité d'énergie est contenue dans ce champ ? (c) De quel facteur l'intensité du champ changera-t-elle si la largeur de l'entrefer est réduite à 1 mm ? De quel facteur l'énergie changera-t-elle ?
4. Parfois, un électro-aimant a un comportement particulier. La Fig. 2.43 montre un électro-aimant et un aimant permanent situés à une grande distance l'un de l'autre. On les rapproche, Fig. 2.43b (sans les retourner au passage). Vont-ils s'attirer ou se repousser ? La dénomination du pôle de l'électro-aimant a été délibérément omise. Pourquoi ?

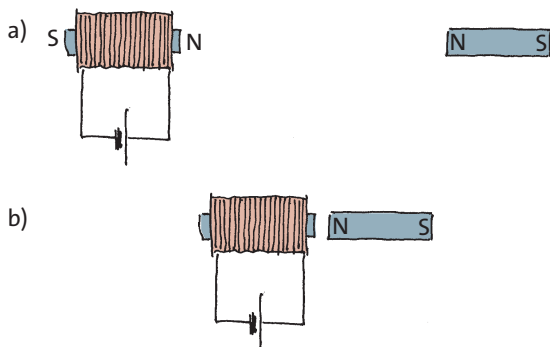


Fig. 2.43 Pour l'exercice 4

## 2.12 Intensité du champ magnétique, magnétisation et densité de flux magnétique

Nous n'avons pas encore appris à décrire la magnétisation d'un matériau de manière quantitative, c'est-à-dire au moyen de chiffres. C'est ce que nous allons faire maintenant.

Tout comme l'intensité du champ magnétique, la magnétisation peut être représentée par des lignes. Cela signifie que la magnétisation, en tant que grandeur physique — tout comme l'intensité du champ — est une grandeur vectorielle. Le symbole de ce vecteur est  $\vec{M}$ .

Si l'on augmente le courant électrique dans la bobine de la Fig. 2.42, la magnétisation dans le noyau de fer ainsi que l'intensité du champ vont augmenter. Par conséquent, nous pouvons utiliser pour la magnétisation dans le noyau de fer la même unité de mesure que l'intensité du champ dans l'entrefer. Nous définissons qu'aux zones des pôles du noyau de fer de la Fig. 2.42, la magnétisation à l'intérieur est égale à l'intensité du champ à l'extérieur :

$$\vec{M}_{\text{intérieur}} = \vec{H}_{\text{extérieur}}$$

Au premier abord, il semble que cette définition ne s'applique qu'à un aimant très spécifique. Cependant, la magnétisation peut en fait être définie de cette façon chaque fois que les lignes de magnétisation se poursuivent comme des lignes de champ dans une zone frontière sans coudes.

Revenons encore une fois à l'aimant en anneau.

Ici, une seule ligne fermée peut être suivie sous la forme d'un chemin fermé. Dans une partie du chemin, la ligne est une ligne de magnétisation, dans l'autre partie du chemin, c'est une ligne de champ. Plus tard, nous étudierons des phénomènes qui ne nécessitent pas de distinction entre la magnétisation et l'intensité du champ magnétique. Dans ce cas, il est utile de regrouper la magnétisation et l'intensité du champ magnétique en une seule grandeur physique. Nous définissons :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{M} + \vec{H}) \tag{2.5}$$

La nouvelle grandeur est appelée densité de flux magnétique. En raison du facteur  $\mu_0$ ,  $\vec{B}$  n'a pas la même unité de mesure que  $\vec{H}$  et  $\vec{M}$ .

Nous avons :

$$\frac{\text{Wb}}{\text{A} \cdot \text{m}} \cdot \frac{\text{A}}{\text{m}} = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = \text{Tesla}$$

Nous pouvons déjà voir un avantage qui vient avec l'application de la densité de flux. Le théorème qui dit que les lignes de champ commencent là où les lignes de magnétisation finissent, et vice versa, peut maintenant être formulé de manière plus simple :

Les lignes de densité de flux n'ont ni début ni fin.

Comparons cela à une situation analogue. Prenons l'exemple d'une boucle fermée constituée de plusieurs morceaux de fil. Certains morceaux sont en cuivre et d'autres en aluminium. La règle suivante s'applique au circuit : un fil d'aluminium commence là où se termine un fil de cuivre, et un fil de cuivre commence là où se termine un fil d'aluminium. La règle peut être formulée plus brièvement si le matériau n'a pas d'importance : le fil métallique n'a ni début ni fin.

À partir de l'équation (2.5), nous pouvons conclure que :

- à l'extérieur des substances magnétisables (c'est-à-dire les matériaux magnétiquement durs et doux), là où la magnétisation est nulle, nous avons donc :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

- et à l'intérieur des matériaux magnétiques doux, là où l'intensité du champ magnétique est nulle, nous obtenons :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{M}.$$

Rappelons qu'à l'intérieur des matériaux magnétiquement durs, le vecteur magnétisation  $\vec{M}$  est bien sûr non nul et que le champ magnétique  $\vec{H}$  quant à lui peut avoir n'importe quelle valeur (voir la section 2.4).

## 2.13 La bobine – l'inductance

Nous avons déjà comparé plusieurs fois la bobine avec le condensateur. Ces deux dispositifs sont des composants électriques importants. Dans les appareils électroniques, on trouve à la fois des bobines et des condensateurs. Nous aimerions maintenant pousser la comparaison encore plus loin.

Un condensateur est caractérisé par sa capacité. La capacité dépend des dimensions géométriques du condensateur, mais pas de la tension appliquée ou de

la charge sur les plaques. Si nous voulons installer un condensateur quelque part, nous devons connaître la capacité du condensateur. Si nous devons acheter un condensateur, nous devrions indiquer sa capacité.

Il existe une grandeur physique qui caractérise une bobine de manière similaire : l'*inductance*  $L$ . L'inductance dépend également des dimensions géométriques de la bobine (le nombre de spires, entre autres) et non, par exemple, du courant dans la bobine. L'unité de mesure de l'inductance est le Henry (H). Elle est égale à

$$H = \frac{\text{Wb}}{\text{A}} = \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}}.$$

Nous admettrons la formule donnant l'inductance d'une bobine de longueur  $l$ , de  $n$  tours et de section transversale  $A$  :

$$L = \mu_0 \cdot n^2 \cdot \frac{A}{l}$$

$n$  = nombre de tours de la bobine

$A$  = aire de la section transversale de la bobine

$l$  = longueur de la bobine

$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}/(\text{A} \cdot \text{m})$  = constante magnétique

Comparez le résultat avec la formule de la capacité du condensateur. Le symbole technique de la bobine est constitué de quatre demi-cercles alignés, voir aussi la Fig. 2.44.

L'intérêt de l'inductance est de pouvoir relier simplement l'intensité du courant traversant la bobine à une nouvelle grandeur physique qui se révélera très utile par la suite : le flux magnétique.

Le *flux magnétique* dans une bobine est le produit de la densité de flux magnétique  $B$  et de la section transversale  $A$  de la bobine :

$$\Phi = \mu_0 \cdot H \cdot A = B \cdot A$$

Nous avons la propriété suivante pour le flux magnétique dans une bobine :

Le flux magnétique  $\Phi$  dans une bobine est proportionnel au courant électrique qui traverse la bobine :

$$\Phi = \frac{1}{n} \cdot L \cdot I$$

$L$  est l'inductance de la bobine.

Par conséquent, l'inductance de la bobine nous indique comment un flux magnétique puissant peut être créé avec un courant électrique donné.

Exercices

1. Une bobine de 500 tours a une section transversale de  $10 \text{ cm}^2$  et une longueur de 8 cm. Calculez son inductance.
2. Une bobine enroulée de manière lâche est étendue à deux fois sa longueur. Comment son inductance change-t-elle ?

## 2.14 L'énergie du champ magnétique

Dans une bobine, traversée par un courant électrique, il existe un champ magnétique qui contient de l'énergie, tout comme le champ électrique contient également de l'énergie. Nous avons détaillé la formule donnant le contenu en énergie du champ électrique dans le condensateur :

$$E = \frac{C}{2} U^2.$$

La formule correspondante pour la bobine et son champ magnétique ne sera pas développée mais simplement indiquée. Comme on pouvait s'y attendre, elle est très similaire à la formule du condensateur. Nous remplaçons simplement la capacité par l'inductance et la tension par le courant électrique :

$$E = \frac{L}{2} I^2.$$

La formule de la densité d'énergie dans le champ magnétique est également indiquée sans aucun calcul.

Elle a également la même structure que celle pour le champ électrique :

$$\rho_E = \frac{\mu_0}{2} |\vec{H}|^2.$$

L'énergie dans le champ magnétique d'une bobine peut être calculée à partir de l'inductance et du courant électrique :

$$E = \frac{L}{2} I^2.$$

La densité d'énergie de tout champ magnétique peut être calculée à partir de l'intensité du champ magnétique :

$$\rho_E = \frac{\mu_0}{2} |\vec{H}|^2.$$

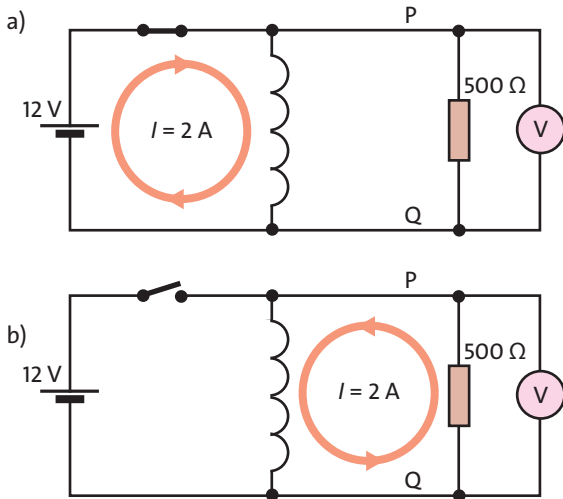
Exercices

1. L'intensité du champ magnétique de la Terre est d'environ  $6,4 \text{ A/m}$ . Quelle quantité d'énergie est contenue dans  $1 \text{ m}^3$  de ce champ ?
2. Nous supposons de manière approximative que le champ entre les pôles des deux aimants droits de la Fig. 2.14a est homogène et limité à l'espace situé entre les deux surfaces des pôles. La surface du pôle est de  $4 \text{ cm}^2$ , la distance entre les aimants de  $0,5 \text{ cm}$  et l'intensité du champ magnétique de  $120\,000 \text{ A/m}$ . Quelle quantité d'énergie est contenue dans le champ ?
3. Un courant électrique de  $2,5 \text{ A}$  circule dans une bobine dont l'inductance est de  $0,01 \text{ mH}$ . La bobine a une longueur de  $10 \text{ cm}$  et une section transversale de  $4 \text{ cm}^2$ .  
(a) Quelle quantité d'énergie est contenue dans le champ de la bobine ? (b) Quelle est la densité d'énergie à l'intérieur de la bobine ?
4. Le fil d'une bobine présente normalement une résistance électrique. Une bobine ayant une inductance de  $0,2 \text{ mH}$  et une résistance de  $500 \Omega$  est connectée à une source de tension de  $200 \text{ V}$ . Quelle quantité d'énergie sera stockée dans le champ magnétique de la bobine au cours du processus ?
5. (a) Vous connectez un condensateur à une alimentation électrique. Ainsi, un champ est créé dans le condensateur. L'énergie du champ est fournie par l'alimentation électrique. Maintenant, vous déconnectez le condensateur de l'alimentation électrique. Le champ sera maintenu, au moins pendant un certain temps. Par conséquent, l'énergie reste stockée dans le condensateur. Vous connectez maintenant une bobine à une alimentation électrique, ce qui crée un champ dans la bobine. L'énergie du champ est fournie par l'alimentation électrique. Vous souhaitez maintenant déconnecter la bobine du bloc d'alimentation de manière à ce que le champ qu'elle contient ne disparaisse pas. Comment pouvez-vous faire cela ?  
(b) Le condensateur détaché de l'alimentation électrique perd lentement son énergie. Quel est le défaut du condensateur qui provoque cette perte ? La bobine détachée de l'unité d'alimentation perd son énergie très rapidement. Quel est le défaut de la bobine qui provoque cette perte ? Il existe des bobines qui ne présentent pas ce défaut. De quel type de bobines s'agit-il ?

## 2.15 « Décharge » de la bobine

Un courant électrique circule dans la bobine de la Fig. 2.44a ; nous supposons que le courant est de  $2 \text{ A}$ . Par conséquent, la bobine contient une certaine quantité de champ magnétique et donc une certaine quantité d'énergie.

Nous ouvrons maintenant l'interrupteur, Fig. 2.44b. Juste après l'ouverture, le champ est tel qu'il était peu de temps auparavant car son énergie ne peut pas disparaître instantanément. Cependant, le fait que le champ



**Fig. 2.44** (a) Un courant électrique de 2 A circule dans la bobine. (Le courant qui traverse la résistance est très faible). (b) Immédiatement après l'ouverture de l'interrupteur, le courant électrique de 2 A doit traverser la résistance. Cela crée une tension élevée, mais le courant électrique décroît très rapidement.

soit toujours là signifie également que le courant électrique doit toujours circuler, car aucun champ n'est possible sans courant, et aucun courant ne peut exister sans champ. Le courant doit être le même qu'avant l'ouverture de l'interrupteur, c'est-à-dire 2 A. Comme le circuit de la batterie est interrompu, ces 2 A circulent maintenant dans la résistance.

Nous pouvons donc en conclure que si un courant électrique circule dans la résistance, la tension aux bornes de la résistance doit avoir la valeur correspondante ; dans notre cas

$$U = R \cdot I = 500 \, \Omega \cdot 2 \, \text{A} = 1000 \, \text{V}.$$

Nous voyons donc qu'une tension apparaît entre les extrémités de la résistance et donc entre le conducteur supérieur P et le conducteur inférieur Q lorsque l'interrupteur est ouvert. Cette tension est beaucoup plus élevée que la tension entre P et Q avant l'ouverture de l'interrupteur.

On peut aussi dire : le courant qui doit continuer à circuler après l'ouverture de l'interrupteur, et qui ne peut circuler qu'à travers la résistance, crée cette tension.

Ce que nous venons de dire n'est cependant valable que pour le premier instant, c'est-à-dire pour le « temps zéro ». Que se passe-t-il ensuite ? Lorsqu'un courant électrique traverse la résistance, de l'entropie y est générée. Cela nécessite de l'énergie qui provient de la bobine.

Le courant d'énergie correspondant est lié au courant électrique selon la formule suivante :

$$P = R \cdot I^2.$$

(L'équation résulte de  $P = U \cdot I$  et  $U = R \cdot I$ .) Par conséquent, l'énergie dans la bobine diminue. Cela signifie cependant que le courant électrique diminue également en raison de :

$$E = \frac{L}{2} I^2.$$

Lorsque le courant électrique diminue, la sortie d'énergie de la bobine diminue également puisque :

$$P = R \cdot I^2.$$

Par conséquent, le courant électrique diminue plus lentement qu'avant, etc. etc. Vous voyez la logique :

*Plus le courant électrique est faible, plus il diminue lentement.*

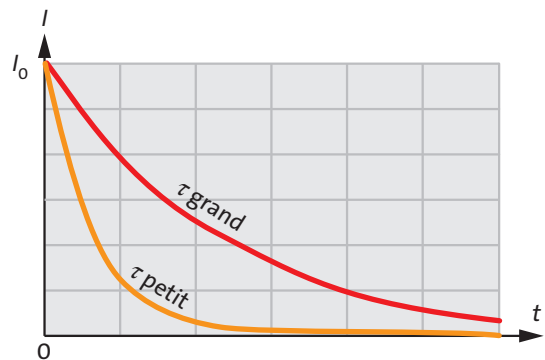
Cette phrase peut vous sembler familière. Nous avons déjà examiné des phénomènes similaires. Dans le cas d'une décharge de condensateur, nous avons :

*Plus la tension est faible, plus elle diminue lentement.*

Ici aussi, nous pourrions développer une équation différentielle et chercher une solution. Nous allons gagner du temps car ce calcul serait le même que pour le condensateur. Seules quelques grandeurs physiques sont à remplacer par d'autres. Pour la bobine « en cours de décharge », nous obtenons :

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

c'est-à-dire que le courant électrique « décroît » exponentiellement, Fig.2.45.  $I_0$  est le courant immédiatement après l'ouverture de l'interrupteur.



**Fig. 2.45** Un long temps de décroissance  $\tau$  signifie que le courant dans la bobine diminue lentement.



## Comment le champ magnétique agit mécaniquement sur un courant électrique

Le temps de décroissance  $\tau$  est :

$$\tau = \frac{L}{R}$$

On voit que pour obtenir une décroissance lente, l'inductance de la bobine doit être grande et la résistance de la résistance faible.

« Décharge » d'une bobine à travers une résistance

Le courant électrique décroît de façon exponentielle :

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

$$\tau = \frac{L}{R} = \text{temps de décroissance}$$

Le fait que le courant électrique, qui circule dans le circuit de la batterie, s'échappe dans la résistance lorsque l'interrupteur est ouvert peut être illustré en utilisant une ampoule électrique à la place de la résistance, Fig. 2.46. Après l'ouverture de l'interrupteur, l'ampoule s'allume pendant un court instant. (On choisira une ampoule qui ne s'allume pas sous la tension de batterie de 12 V).

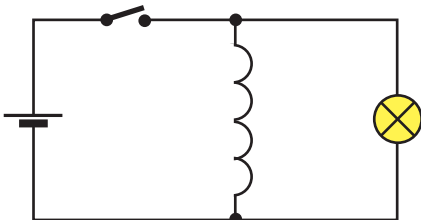
Nous aimerions maintenant établir une équation qui semble un peu ennuyeuse au premier abord, mais que nous reverrons dans la prochaine partie. Ce n'est qu'alors que nous comprendrons son importance.

Nous établissons le bilan énergétique du circuit électrique de la Fig. 2.44. L'interrupteur vient d'être ouvert. Nous avons :

$$P = \frac{dE}{dt}$$

En d'autres termes : le courant d'énergie  $P$  qui circule dans la résistance est égal au taux de variation du contenu en énergie de la bobine.

Maintenant, nous remplaçons le terme de gauche :



**Fig. 2.46** La tension de la batterie n'est pas suffisante pour allumer l'ampoule. L'ampoule ne s'allume que pendant un court instant lorsque l'interrupteur est ouvert. L'énergie nécessaire provient du champ magnétique de la bobine.

$$P = U \cdot I.$$

A droite, nous remplaçons la grandeur  $E$  par :

$$E = \frac{L}{2} I^2.$$

Pour ce faire, nous devons d'abord différencier  $E$  par rapport au temps. Pour ce faire, nous appliquons la règle de dérivation d'un produit :

$$\frac{dE}{dt} = \frac{L}{2} \cdot 2I \frac{dI}{dt} = L \cdot I \cdot \frac{dI}{dt}.$$

Nous insérons et obtenons :

$$U \cdot I = L \cdot I \frac{dI}{dt},$$

et ainsi :

$$U = L \frac{dI}{dt}$$

Le terme de droite peut alors être transformé au moyen de :

$$n \cdot \Phi = L \cdot I$$

et nous obtenons finalement :

$$U = n \frac{d\Phi}{dt}$$

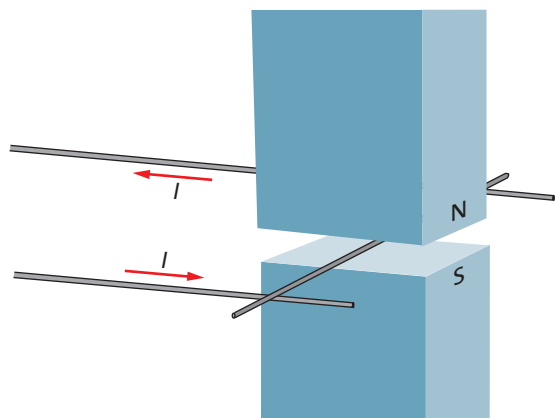
Soit : la tension aux bornes de la résistance est égale à  $n$  fois le taux de variation du flux magnétique dans la bobine. Nous verrons plus tard qu'il s'agit d'une loi célèbre : la loi d'induction de Faraday.

### Exercices

- Mesure de l'inductance d'une bobine : la bobine est intégrée dans un circuit comme le montre la Fig. 2.44. La résistance est de  $500 \Omega$ . On constate que la tension diminue jusqu'à un dixième de sa valeur initiale en 4 ms. Quelle est la valeur de  $L$  ?
- Selon quelle fonction temporelle l'énergie dans la bobine décroît-elle ?

## 2.16 Comment le champ magnétique agit mécaniquement sur un courant électrique

Nous le savons déjà : si un pôle magnétique est amené en un point  $P$  où il y a un champ (intensité de



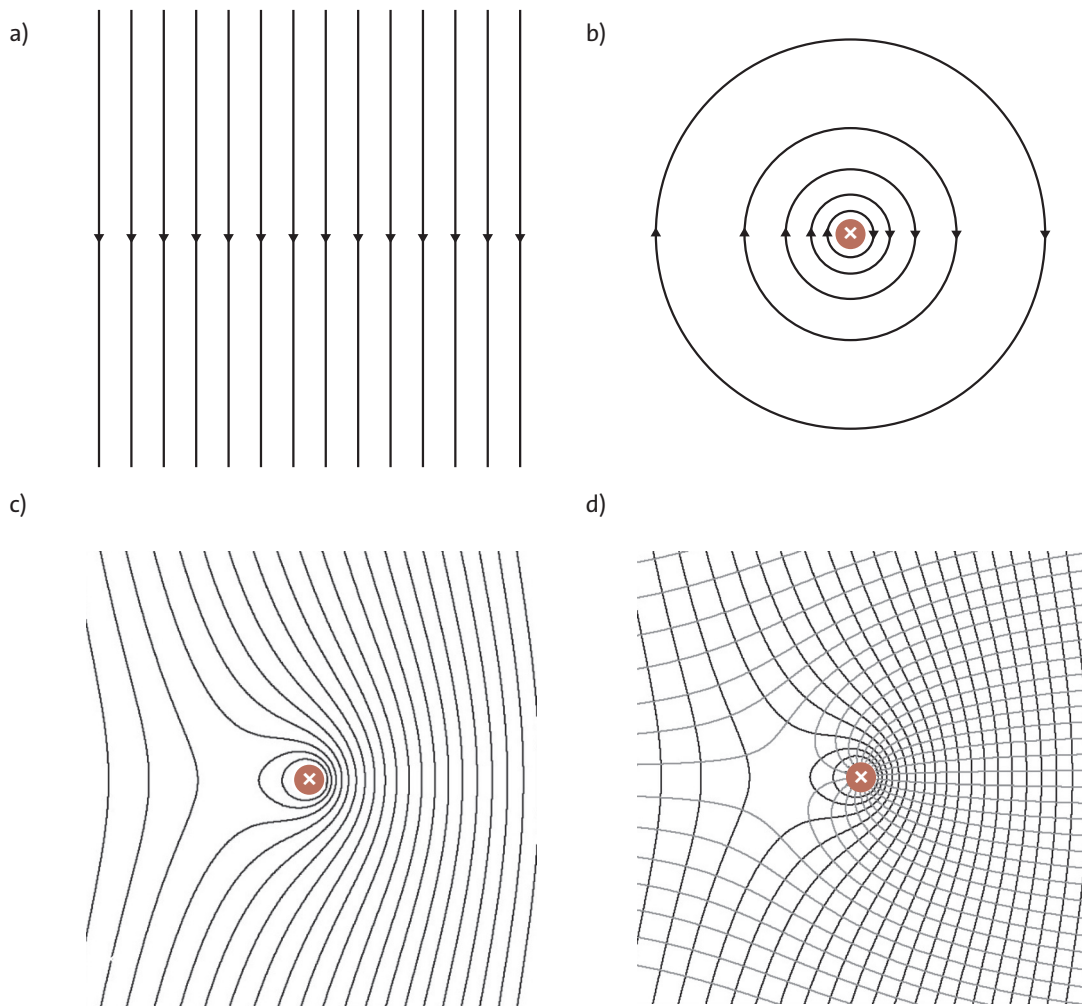
**Fig. 2.47** Le conducteur mobile parcouru par le courant électrique est poussé vers la gauche par le champ magnétique.

champ  $\vec{H}$ ), il sera attiré dans la direction du vecteur  $\vec{H}$  par le champ.

Il se produit quelque chose de similaire si un courant électrique, qui circule perpendiculairement aux lignes de champ, est amené au point P à la place de l'aimant. Nous plaçons un conducteur électrique dans le champ presque homogène entre les pôles d'un aimant, Fig. 2.47, et nous constatons que le conducteur est poussé sur le côté par le champ.

L'établissement de la formule pour le courant de quantité de mouvement correspondant est un peu difficile et ne sera pas abordé ici. Le résultat lui-même, cependant, est simple. La formule suivante s'applique à un courant électrique qui circule perpendiculairement au vecteur de champ du champ sans courant :

$$F = I \cdot \Delta s \cdot B$$



**Fig. 2.48** (a) Champ homogène ; (b) courant électrique avec son champ ; (c) champ résultant ; (d) champ résultant avec surfaces de champ

## Comment le champ magnétique agit mécaniquement sur un courant électrique

Ici,  $I$  est le courant électrique,  $B$  est la densité de flux magnétique du champ sans le conducteur et  $\Delta s$  est la longueur de la partie du conducteur qui est située dans la zone du champ magnétique.  $F$  est l'amplitude du vecteur courant de quantité de mouvement. Ce vecteur est perpendiculaire à la densité de flux magnétique (et donc à l'intensité du champ) et perpendiculaire au conducteur électrique.

Gardez à l'esprit que le champ initial est fortement modifié par le conducteur. Néanmoins, la densité de flux du champ initial doit être insérée dans la formule.

Un conducteur avec un courant électrique est poussé perpendiculairement à la direction du champ sans le conducteur.

Le courant de quantité de mouvement correspondant est

$$F = I \cdot \Delta s \cdot B. \quad (2.6)$$

Il y a trois directions pertinentes dans cette loi :

- 1. direction du courant électrique (= direction du vecteur densité de courant  $\vec{j}$ )
- 2. direction du vecteur densité de flux  $\vec{B}$  (= direction du vecteur intensité de champ  $\vec{H}$ )
- 3. direction du vecteur courant de quantité de mouvement  $\vec{F}$

La relation entre ces directions peut être mémorisée à l'aide de la règle des trois doigts de la main droite, Fig. 2.49 : lorsque le pouce pointe dans la direction du courant électrique et l'index dans la direction de l'intensité du champ, le majeur fléchi indique la direction du vecteur courant de quantité de mouvement.

### Orbites de particules chargées

Nous appliquons l'équation (2.6) à un faisceau de particules chargées, comme des électrons, qui sont envoyés à travers un champ magnétique dans une di-

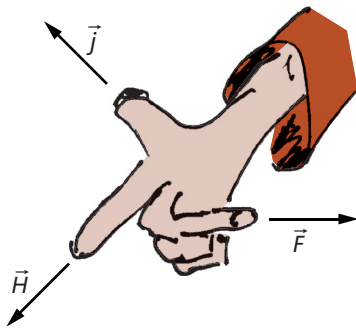


Fig. 2.49 Règle des trois doigts de la main droite

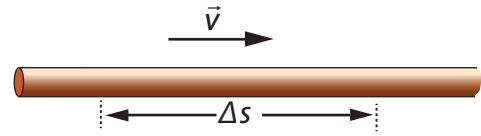


Fig. 2.50 Portion d'un faisceau de particules chargées

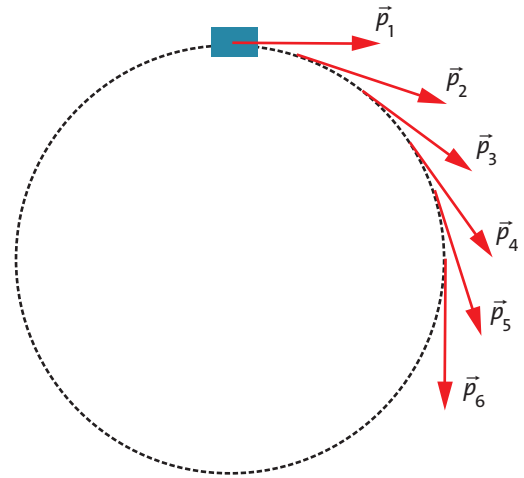


Fig. 2.51 La particule reçoit à chaque instant une nouvelle quantité de mouvement, dont la direction est perpendiculaire à la direction de la quantité de mouvement qu'elle possède actuellement. L'image montre les vecteurs quantité de mouvement à six moments différents.

rection perpendiculaire à celle du champ. Nous observons une portion de longueur  $\Delta s$  du faisceau, Fig. 2.50.

Nous calculons le courant de quantité de mouvement qui circule dans ce faisceau de particules, en fonction de sa charge et de sa vitesse. Par conséquent, nous exprimons le courant électrique dans l'équation (2.6) au moyen de

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}.$$

Ici,  $\Delta Q$  est la charge du faisceau de particules et  $\Delta t$  est le temps dont la charge a besoin pour passer par  $\Delta s$ . En outre, nous remplaçons :

$$\Delta s = v \cdot \Delta t,$$

où  $v$  est la vitesse des particules. On obtient :

$$F = I \cdot \Delta s \cdot B = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot v \cdot \Delta t \cdot B = \Delta Q \cdot v \cdot B$$

Habituellement, les particules portent la charge élémentaire  $e$ . Dans ce cas, nous pouvons remplacer  $\Delta Q$  par  $e$ .

Les particules chargées qui se déplacent dans un champ magnétique reçoivent une quantité de mouvement transversale à travers le champ :

$$F = e \cdot v \cdot B$$

$e$  = charge électrique des particules

$v$  = vitesse des particules

Là encore, la règle des trois doigts s'applique aux directions, ce qui signifie que le vecteur vitesse doit être utilisé à la place du vecteur densité de courant.

Sous forme vectorielle, la relation peut être exprimée comme suit :

$$\vec{F} = e \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

Cette règle est intéressante. Nous imaginons une particule qui se déplace dans un champ magnétique homogène à angle droit par rapport aux lignes de champ. Par conséquent, son orbite est située sur une surface de champ. La particule reçoit constamment une quantité de mouvement transversale à travers le champ : la direction de la quantité de mouvement qu'elle reçoit est toujours transversale à celle de la quantité de mouvement qu'elle présente. Elle est donc déviée.

Nous avons déjà vu qu'un tel processus conduit à un mouvement circulaire, Fig.2.51. Les particules décrivent donc une orbite circulaire dans un champ magnétique homogène.

Nous avons exprimé le taux de variation de la quantité de mouvement d'un corps, qui effectue un mouvement circulaire, par sa vitesse  $v$ , sa masse  $m$  et le rayon  $r$  de son orbite :

$$\frac{dp}{dt} = m \frac{v^2}{r}$$

Puisque le taux de changement de sa quantité de mouvement est égal au courant de quantité de mouvement, soit :

$$\frac{dp}{dt} = F,$$

on obtient :

$$m \frac{v^2}{r} = e \cdot v \cdot B.$$

Nous divisons les deux termes de l'équation par  $v$  et ramenons  $r$  d'un côté.

Particules dans un champ magnétique

$$r = \frac{m \cdot v}{e \cdot B} \quad (2.7)$$

Le rayon de l'orbite est grand lorsque la particule est lourde et rapide ; il est petit lorsque l'intensité du champ est élevée.

Si le champ magnétique n'est pas homogène,  $r$  est le rayon de courbure de l'orbite à chaque instant.

L'équation nous indique que les faisceaux de particules peuvent être « manipulés » au moyen de champs magnétiques. En particulier, les faisceaux d'électrons peuvent être focalisés et déviés, tout comme les faisceaux lumineux peuvent être focalisés au moyen de lentilles et déviés dans des prismes.

Ce procédé est appliqué dans les microscopes électroniques et dans les accélérateurs de particules.

### Mesure de $e/m$

L'équation (2.7) contient deux grandeurs qui caractérisent la particule : sa masse  $m$  et sa charge électrique  $e$ . Ces deux valeurs sont très petites et donc difficiles à mesurer. Cependant, l'équation nous permet de mesurer le rapport entre les deux.

Nous créons un faisceau d'électrons dans un champ magnétique homogène. L'orbite des électrons peut être facilement visualisée. À partir de l'équation (2.7), nous pouvons conclure que :

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{r \cdot B}$$

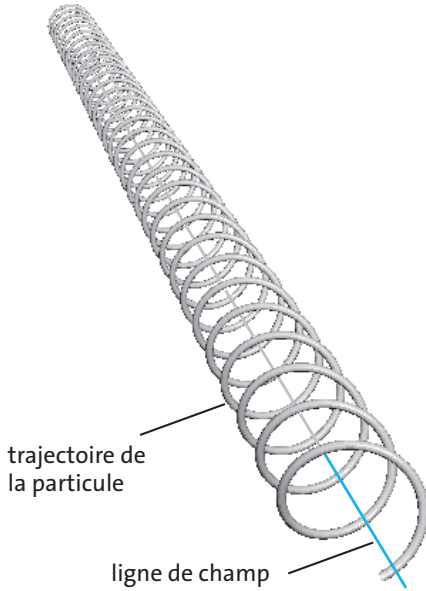
Toutes les quantités du terme de droite de l'équation peuvent être facilement mesurées. Si la charge élémentaire est également mesurée au moyen d'une autre méthode, la masse de l'électron peut donc être calculée. Rappelez-vous :

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = 0,911 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$$

### Les particules chargées suivent les lignes de champ magnétique

Nous avons supposé jusqu'à présent que les électrons circulent transversalement aux lignes de champ dans un champ magnétique homogène. Mais que feront-ils s'ils sont envoyés dans une autre direction ? Imaginons à nouveau un champ homogène. Il doit remplir un grand espace ; dans cet espace, il doit y avoir un vide pour que les électrons puissent voler librement. Si un électron part dans n'importe quelle direction, nous pouvons décomposer sa vitesse en deux composantes : une composante transversale à l'intensité du champ et une autre parallèle à celle-ci. En d'autres termes : une composante parallèle à une surface de champ et une autre parallèle à une ligne de champ. Pour voir comment l'électron se déplace, nous examinons chacune



**Fig. 2.52** La particule se déplace sur une trajectoire hélicoïdale autour d'une ligne de champ.

de ces deux composantes séparément. Un mouvement circulaire est associé à une vitesse perpendiculaire aux lignes de champ, et un mouvement linéaire normal à la vitesse parallèle aux lignes de champ. Nous avons donc un mouvement circulaire et en même temps un mouvement normal dans une direction transversale au cercle. Le résultat est un mouvement hélicoïdal, Fig. 2.52.

Dans certaines situations, le mouvement peut être décrit comme suit : les électrons suivent les lignes de champ magnétique, ce qui est particulièrement approprié lorsque les intensités de champ sont très élevées.

C'est le cas, par exemple, dans un réacteur de fusion où l'intensité des champs magnétiques est d'environ  $5 \cdot 10^6$  A/m. Les particules sont des électrons, des deutérons et des tritons. (Un deutéron est composé d'un proton et d'un neutron, un triton d'un proton et de deux neutrons). La température du réacteur est d'environ 100 millions de kelvins.

Cela signifie que les électrons se déplacent à une vitesse d'environ  $4 \cdot 10^7$  m/s. Nous calculons le rayon de leur trajectoire hélicoïdale :

$$r = \frac{m \cdot v}{e \cdot B} = \frac{10^{-30} \text{ kg} \cdot 4 \cdot 10^7 \text{ m/s}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 5 \text{ T}}$$

$$= 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$= 50 \text{ } \mu\text{m}$$

L'hélice est donc très fine par rapport à la taille globale du réacteur (plusieurs mètres) et nous pouvons raisonnablement affirmer que les électrons suivent les lignes de champ.

### L'effet Hall

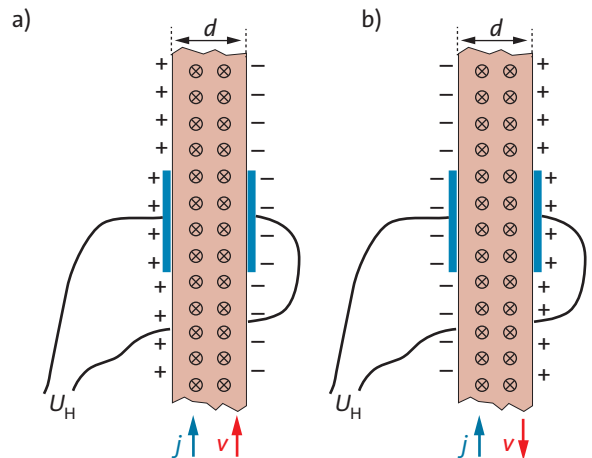
Un conducteur électrique plat, parcouru par un courant électrique, est placé dans un champ magnétique ; les vecteurs d'intensité du champ sont perpendiculaires à la surface du conducteur et perpendiculaires à la direction du courant, Fig. 2.53.

Sur la figure, la direction du courant (direction du vecteur de densité de courant) va du bas vers le haut. Nous supposons d'abord avoir affaire à des porteurs de charge mobiles positifs, Fig. 2.53a. Leur direction de déplacement est la même que la direction du courant électrique. Le champ magnétique pousse maintenant les porteurs de charge vers la gauche (règle des trois doigts de la main droite). Ils s'accumulent sur le côté gauche, de sorte qu'une partie d'entre eux manque sur le côté droit, ce dernier prenant une charge négative. Il se crée alors un champ électrique qui attire les porteurs de charge vers la droite. Peu après l'établissement du courant électrique, la poussée du champ magnétique vers la gauche devient égale à la traction du champ électrique vers la droite. Cela signifie que les porteurs de charge peuvent maintenant se déplacer en ligne droite.

Le courant de quantité de mouvement, qui passe par l'intermédiaire du champ électrique, c'est-à-dire

$$F_{el} = e \cdot E,$$

est maintenant égal au courant de quantité de mouvement



**Fig. 2.53** Effet Hall. Direction de l'intensité du champ magnétique : vers l'intérieur du plan de l'image.

$$F_{\text{mag}} = e \cdot v \cdot B$$

qui passe par le champ magnétique. Par conséquent, nous avons :

$$E = v \cdot B$$

Cette création d'une charge électrique à la surface du conducteur est appelée *effet Hall*.

La relation entre l'intensité du champ électrique  $E$  dans le conducteur et la tension  $U_H$  entre les deux faces est la suivante :

$$U_H = E \cdot d .$$

Ainsi,

$$U_H = v \cdot B \cdot d \quad (2.8)$$

$U_H$  peut être facilement mesuré.

L'effet Hall a de nombreuses applications. Nous aimerions en présenter deux.

### Signe plus/moins des porteurs de charge :

Nous avons vu que si les porteurs de charge mobiles sont chargés positivement, le côté gauche de la Fig. 2.53a sera chargé positivement. Nous supposons maintenant que le même courant électrique est créé par des porteurs de charge négatifs, Fig. 2.53b. Les porteurs de charge de la figure doivent circuler du haut vers le bas pour que la direction du courant reste la même que précédemment. Par rapport à leur sens de déplacement, ils sont maintenant déviés vers la droite, c'est-à-dire vers la gauche de notre point de vue. (En appliquant la règle des trois doigts, nous devons inverser le sens de déviation des particules car elles portent une charge négative). Le côté gauche (de notre point de vue) prendra donc une charge négative, le côté droit une charge positive. Le signe de la tension entre les faces nous permet donc de savoir quel est le signe plus/moins des porteurs de charge.

Pour la plupart des métaux, les porteurs de charge mobiles sont des électrons, c'est-à-dire des particules négatives. Pour certains métaux et pour de nombreux semi-conducteurs, les porteurs de charge mobiles sont des particules positives, appelées trous. Un trou peut être imaginé comme un électron manquant dans un grand « lac d'électrons », un peu comme les bulles dans l'eau minérale qui peuvent être considérées comme de l'eau manquante. La bulle se comporte comme un corps ayant une masse négative (puisque'elle s'élève vers le haut au lieu de tomber). Un trou dans le lac

d'électrons d'un conducteur électrique se comporte en conséquence comme une particule ayant une charge électrique positive.

### Le capteur à effet Hall

Le montage de la Fig. 2.53 peut être utilisé pour mesurer la densité du flux magnétique ou l'intensité du champ. On l'appelle alors un capteur à effet Hall. Lorsqu'un courant électrique constant est envoyé dans un capteur, la tension  $U_H$  est proportionnelle à la densité du flux magnétique et à l'intensité du champ. Mesurer  $U_H$  revient donc à mesurer en même temps l'intensité du champ magnétique. La plupart des appareils de mesure de champ magnétique tirent parti de cet effet. Comme un capteur à effet Hall est très bon marché et robuste, il est également utilisé comme capteur de la position de tout ce qui se trouve dans la voiture : les portes sont-elles fermées ? La ceinture de sécurité est-elle bouclée ? À quelle vitesse le vilebrequin tourne-t-il ? Un petit aimant est toujours fixé quelque part, et le capteur à effet Hall détecte si l'aimant est positionné à l'endroit souhaité.

### Exercices

1. Un fil droit, dans lequel circule un courant électrique de 200 A, est placé perpendiculairement aux lignes de champ du champ magnétique de la Terre (intensité du champ 40 A/m). Quel courant de quantité de mouvement circule dans un morceau du fil d'une longueur de 1 m ?
2. Un faisceau d'électrons entre dans un champ magnétique homogène avec  $H = 2400$  A/m à partir d'un espace sans champ, Fig. 2.54. Quelle énergie cinétique (en eV) les électrons doivent-ils avoir pour quitter la zone du champ à angle droit par rapport à la direction d'entrée (vers le bas sur la figure) ?

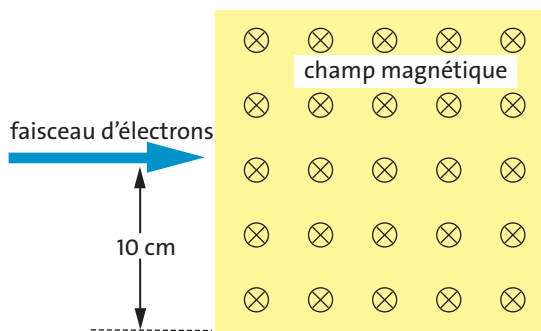


Fig. 2.54 Pour l'exercice 2



### Exercices

- Deux petits échantillons de matériau sont équipés de contacts de manière à ce qu'un courant électrique puisse être envoyé à travers eux dans une direction longitudinale et que la tension de Hall  $U_H$  puisse être mesurée dans la direction transversale correspondante.  
Les deux échantillons ont une largeur de 5 mm (distance des contacts entre lesquels la tension de Hall est mesurée). Ils sont placés dans un champ magnétique avec une densité de flux de 0,2 T et un courant de 200 mA est laissé circuler. Sur l'un, on mesure une tension de Hall de 0,12 mV, sur l'autre de 0,36  $\mu$ V. Quelle est la vitesse des porteurs de charge dans les deux cas ? Quelle pourrait être la cause de cette grande différence ?
- Une solution d'eau salée est pompée à la vitesse de 1,1 m/s à travers un tuyau de verre d'une épaisseur de 2 cm. A un endroit donné, le tuyau traverse un champ magnétique de 3 T perpendiculaire. Quelle est la tension de Hall ? Comment le fait que l'eau contienne un nombre égal d'ions positifs et négatifs influe-t-il sur la tension de Hall ?

## 3 L'INTERACTION ENTRE CHAMPS ÉLECTRIQUE ET MAGNÉTIQUE

### 3.1 Analogie en électromagnétisme

Nous avons beaucoup appris sur deux catégories de phénomènes naturels : d'abord sur l'électricité, puis sur le magnétisme. Vous avez certainement constaté qu'il existe des similitudes entre les deux. Nous les

qualifions d'*analogie*. Les deux catégories ont la même structure conceptuelle et mathématique.

Les deux colonnes du Tab.3.1 contiennent des éléments qui se correspondent : noms des concepts, grandeurs physiques et formules. Le tableau contient également certains éléments qui n'ont pas de correspondant dans l'autre colonne. Enfin, il y a aussi des concepts —

Champ électrique	Champ magnétique
charge électrique $Q$	charge magnétique $Q_m$
potentiel électrique $\varphi$	potentiel magnétique $\varphi_m$
particule électrique chargée (électron, proton, ...).	les particules chargées magnétiquement n'existent pas
courant électrique $I$	le courant magnétique n'existe pas
polarisation $\vec{P}$	magnétisation $\vec{M}$
champ électrique $\vec{E}$	champ magnétique $\vec{H}$
$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$	$\vec{F} = Q_m \cdot \vec{H}$
distribution de charges à symétrie sphérique	distribution de charges à symétrie sphérique
$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$	$H = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{Q_m}{r^2}$
à l'intérieur d'un conducteur électrique $\vec{E} = 0$	à l'intérieur d'un matériau magnétique doux $\vec{H} = 0$
contrainte mécanique	contrainte mécanique
$\sigma_{\parallel} = -\frac{\epsilon_0}{2}  \vec{E} ^2 \quad \sigma_{\perp} = \frac{\epsilon_0}{2}  \vec{E} ^2$	$\sigma_{\parallel} = -\frac{\mu_0}{2}  \vec{H} ^2 \quad \sigma_{\perp} = \frac{\mu_0}{2}  \vec{H} ^2$
densité d'énergie	densité d'énergie
$\rho_E = \frac{\epsilon_0}{2}  \vec{E} ^2$	$\rho_H = \frac{\mu_0}{2}  \vec{H} ^2$
<b>Condensateur</b>	<b>Bobine</b>
$Q = C \cdot U$ capacité $C$	$\Phi = (1/n) \cdot L \cdot I$ inductance $L$
$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$	$L = \mu_0 n^2 \frac{A}{l}$
énergie	énergie
$E = \frac{C}{2} U^2$	$E = \frac{L}{2} I^2$
décroissance de la tension	décroissance du courant
$U = U_0 e^{-t/\tau} \quad \tau = RC$	$I = I_0 e^{-t/\tau} \quad \tau = \frac{L}{R}$

Tab. 3.1 Analogie entre les phénomènes électriques et magnétiques

Electricité	Magnétisme	Gravitation
charge électrique $Q$	charge magnétique $Q_m$	masse $m$
potentiel électrique $\varphi$	potentiel magnétique $\varphi_m$	potentiel gravitationnel $\psi_m$
champ électrique $\vec{E}$	champ magnétique $\vec{H}$	champ de gravité $\vec{g}$
$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$	$\vec{F} = Q_m \cdot \vec{H}$	$\vec{F} = m \cdot \vec{g}$
distribution de charges à symétrie sphérique	distribution de charges à symétrie sphérique	distribution de masses à symétrie sphérique
$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$	$H = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{Q_m}{r^2}$	$g = G \frac{m}{r^2}$

Tab. 3.2 Analogie entre l'électricité, le magnétisme et la gravitation

cas bleutés — qui ne sont pas pertinents dans notre contexte et qui n'ont donc pas encore été traités.

Bien que ce ne soit pas notre sujet pour le moment, il faudrait également à ce stade rappeler une autre analogie. Un troisième domaine peut être ajouté aux deux premiers : la gravitation, Tab. 3.2. Ici, l'analogie n'a pas la même portée — pour une raison simple : alors que la charge électrique et la charge magnétique peuvent être positives et négatives, il n'existe que des masses positives. Il n'y a donc pas d'analogie gravitationnel pour certains effets de l'électricité et du magnétisme. Nous ne pourrions comprendre le fait que la gravitation est le domaine le plus étendu de la physique que si nous connaissons la *Théorie de la Relativité Générale*, qui est complexe.

Un phénomène important ne figure pas dans le tableau : un courant électrique est à l'origine d'un champ magnétique. Ce phénomène montre que l'électricité et le magnétisme ne sont pas seulement structurés de manière analogue, mais qu'ils sont aussi étroitement liés. En appliquant notre analogie, nous pourrions formuler l'hypothèse suivante :

tout comme un courant électrique crée un champ magnétique, un courant magnétique pourrait éventuellement créer un champ électrique.

Mais nous savons que les courants magnétiques n'existent pas. Donc, la réciprocité dans cette phrase n'est-elle pas possible ? Nous verrons dans cette partie que cette réciprocité existe bel et bien.

### 3.2 Induction électromagnétique

Un voltmètre est connecté à une bobine. Si un pôle d'aimant permanent est introduit à l'intérieur de la bobine, Fig. 3.1, l'aiguille du voltmètre dévie, mais seulement tant que le pôle magnétique bouge. Lorsque le pôle magnétique est retiré de la bobine, l'aiguille du voltmètre dévie à nouveau, mais cette fois dans la direction opposée.

Le sens de la déviation du voltmètre dépend également du fait que ce soit le pôle nord ou le pôle sud qui est déplacé dans la bobine.

Examinons ce qui se passe si la bobine est court-circuitée dans l'expérience et intégrons un ampèremètre dans le circuit. L'ampèremètre dévie également lorsque le pôle magnétique est déplacé dans la bobine et à nouveau lorsqu'il est retiré (vous auriez pu vous y attendre).

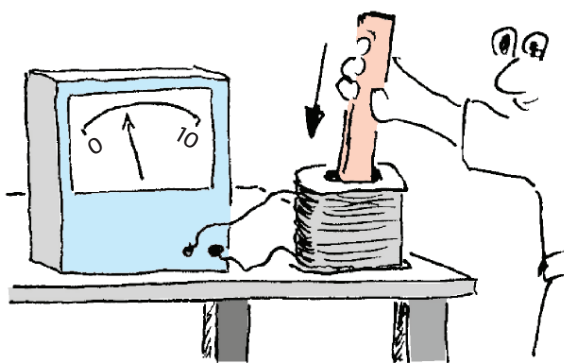


Fig. 3.1 L'aiguille du voltmètre dévie tant que l'aimant permanent est en mouvement.

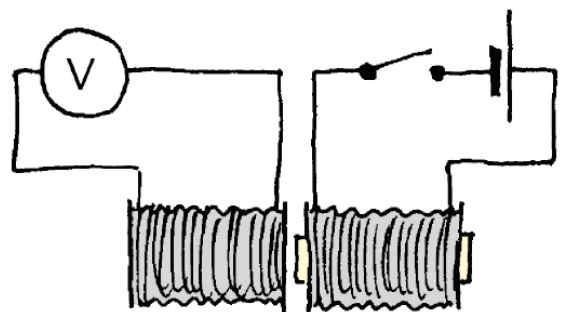


Fig. 3.2 Si l'électro-aimant est mis en marche ou arrêté, l'intensité du champ magnétique dans la bobine varie et une tension est induite.

Ces phénomènes sont appelés *induction électromagnétique*. Nous dirons qu'une tension électrique ou un courant électrique est induit lorsque l'aimant est déplacé.

Il est également possible d'induire une tension (ou un courant) d'une autre manière et sans déplacer quoi que ce soit : en plaçant un électro-aimant à côté de la bobine de manière à ce que son champ pénètre dans la bobine (Fig. 3.2). Si l'électro-aimant est mis en marche ou arrêté, une tension sera à nouveau induite dans la bobine.

Lorsque l'intensité du champ magnétique varie à l'intérieur de la bobine, une tension est créée entre les connexions de la bobine. Dans le cas d'un circuit fermé, un courant électrique circule. Ce processus est appelé induction électromagnétique.

Enfin, réalisons une autre variante de l'expérience d'induction. Plaçons un noyau de fer doux dans la bobine et déformons les extrémités du noyau de manière à ce que l'ensemble du noyau forme un « U ». Ainsi, aucun champ magnétique ne peut plus pénétrer dans la bobine. L'induction s'arrêtera-t-elle également ? Approchons un aimant permanent près des extrémités du noyau de fer doux, Fig. 3.3, jusqu'à ce que les pôles de l'aimant touchent ces extrémités et nous observons une déviation du voltmètre. Comment cela est-il possible ? Le fer dans la bobine a été magnétisé, sa magnétisation a été modifiée.

Si la magnétisation du matériau dans la bobine varie, une tension est également induite.

Nous avons vu qu'avec le vecteur champ magnétique  $\vec{H}$  et la magnétisation  $\vec{M}$  nous pouvons former une seule grandeur physique, à savoir la densité de flux magnétique  $\vec{B}$  :

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{M} + \vec{H})$$

Nous pouvons donc résumer nos observations comme suit :

Si la densité du flux magnétique dans une bobine varie, une tension est créée entre les connexions de la bobine.

Nous allons maintenant examiner de quoi dépend la valeur de la tension induite. Pour cela, choisissons un dispositif particulièrement simple : une petite bobine plate est introduite dans le champ homogène d'une

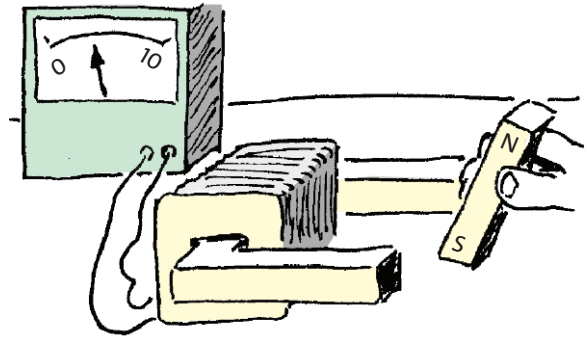


Fig. 3.3 Une modification de la magnétisation à l'intérieur de la bobine provoque également une tension induite.

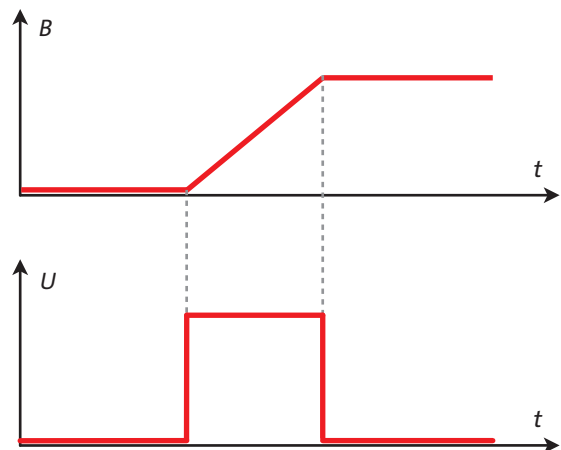


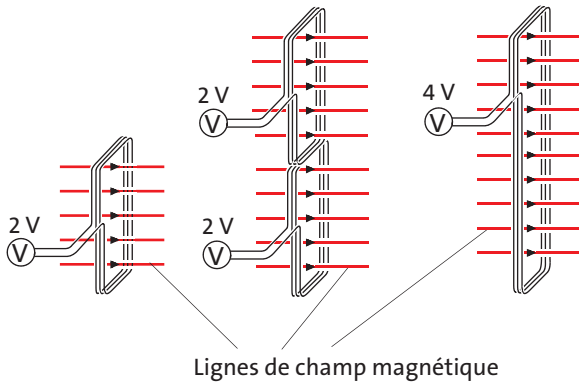
Fig. 3.4 Si la densité de flux change linéairement avec le temps, la tension induite est constante dans le temps.

grande bobine longue. Un voltmètre est relié à la petite bobine. Si le courant électrique dans la grande bobine est modifié, l'intensité du champ magnétique change et une tension est induite entre les connexions de la petite bobine.

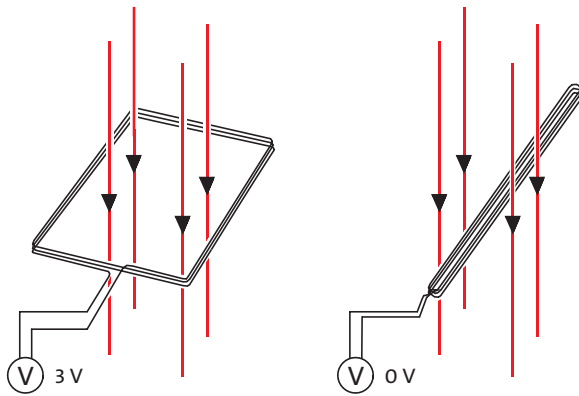
Connectons maintenant la grande bobine à une alimentation électrique qui fournit un courant qui croît linéairement avec le temps. Nous obtenons donc un champ magnétique dont la densité de flux croît linéairement avec le temps, Fig. 3.4.

Bien sûr, cela n'est possible que pendant un temps limité, mais suffisamment long pour notre observation. Nous pouvons voir que la tension induite au niveau de la petite bobine est constante dans le temps. Donc,

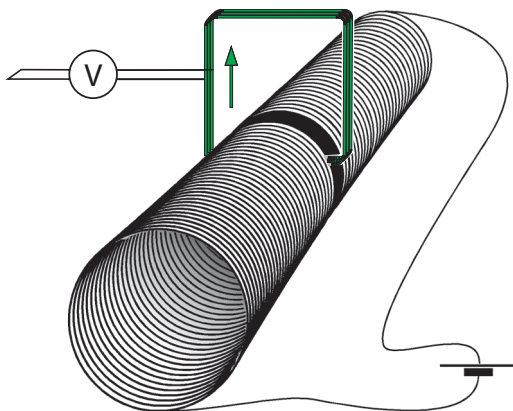
$$\frac{dB}{dt} = \text{const} \Rightarrow U = \text{const.}$$



**Fig. 3.5** La densité de flux croît avec le temps. Si la surface de la bobine double, la tension induite doublera également.



**Fig. 3.6** La densité de flux est constante dans le temps. La bobine est déformée de telle sorte que la surface traversée par les lignes de champ est réduite. Au cours de ce processus, une tension est également induite.



**Fig. 3.7** Si la petite bobine carrée est déplacée hors de la grande bobine, la zone traversée par les lignes de champ diminue.

Si la densité de flux varie plus rapidement, c'est-à-dire si  $dB/dt$  est plus grand, la tension induite sera également plus grande. Plus précisément : si  $dB/dt$  double, la tension induite doublera également. Ainsi,  $U$  est proportionnel à  $dB/dt$  :

$$U \sim \frac{dB}{dt}. \quad (3.1)$$

Nous allons maintenant examiner une autre manière d'agir sur la tension induite.

Si la petite bobine est remplacée par une autre dont la seule différence est l'aire de la section transversale  $A$  (le nombre de tours doit rester le même), nous constatons que la tension induite est proportionnelle à cette aire :

$$U \sim A. \quad (3.2)$$

Ce résultat aurait pu être prédit. Une bobine avec une surface doublée est équivalente à deux bobines placées l'une à côté de l'autre et connectées en série, Fig. 3.5.

Si finalement la bobine est remplacée par une autre dont la seule différence est le nombre de spires, nous trouverons que la tension induite est proportionnelle au nombre de spires  $n$  :

$$U \sim n. \quad (3.3)$$

Ce résultat n'est pas surprenant non plus : une bobine avec le nombre de tours  $2n$  est équivalente à deux bobines connectées en série qui ont chacune un nombre de tours  $n$ .

Les résultats (3.1), (3.2) et (3.3) peuvent être résumés en une seule relation :

$$U \sim nA \frac{dB}{dt}. \quad (3.4)$$

A présent, le signe de proportionnalité peut être remplacé par un signe égal car la densité de flux avait été définie de telle sorte qu'il ne peut y avoir d'autre facteur dans l'équation (3.4). Par conséquent :

$$U = nA \frac{dB}{dt}. \quad (3.5)$$

L'équation (3.5) est presque notre résultat final. Plus tôt, nous avons abrégé le produit  $A \cdot B$  :

$$B \cdot A = \Phi$$

$\Phi$  est le *flux magnétique*. Par conséquent, à partir de l'équation (3.5), nous obtenons la *loi d'induction de Faraday* :

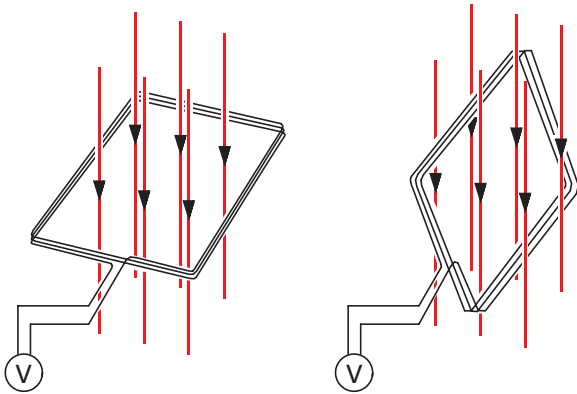


Fig. 3.8 La rotation de la bobine entraîne également une modification du flux magnétique qui la traverse.

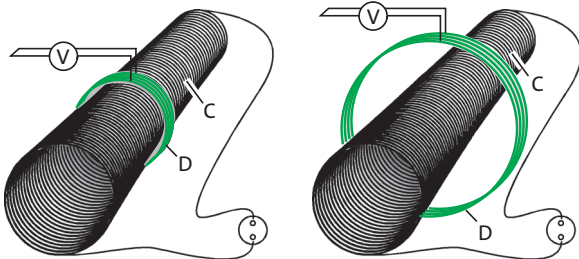


Fig. 3.9 La tension induite est égale à gauche et à droite parce que le flux variable à travers D est égal dans les deux cas.

$$U = n \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Loi d'induction de Faraday} \quad (3.6)$$

Cependant, cette formulation contient plus de choses que ce que nous avons mis au départ. Pour induire une tension, nous avons modifié le flux magnétique  $\Phi$ , et pour modifier le flux, nous avons modifié la densité de flux  $B$ . Si l'équation (3.6) est correcte, il devrait également y avoir une tension induite dans le cas où  $B$  reste constant alors que la surface  $A$  est modifiée. La Fig. 3.6 montre une méthode pour y parvenir.

Mais il existe un moyen encore plus simple : la bobine est déplacée hors du champ magnétique constant, Fig. 3.7. La surface traversée par les lignes de champ diminue, et donc le flux magnétique aussi. Là encore, une tension est induite, ce qui est également le cas, bien sûr, lorsque la bobine est ramenée dans le champ.

Une façon particulièrement pratique de modifier le flux magnétique est illustrée par la Fig. 3.8 : on fait tourner la bobine. Cela conduit également à une modification du flux et à la création d'une tension induite.

L'induction dans un générateur électrique est réalisée de cette manière.

Une variante intéressante d'expérience d'induction est présentée à la Fig. 3.9.

Modifions le courant électrique et, par conséquent, la densité de flux dans la bobine C. La bobine D, entre les connexions de laquelle une tension est induite, est complètement à l'extérieur de C. La section transverse dans l'expérience de gauche est plus petite que celle de droite. Cependant, la valeur de la tension induite ne dépend plus de la section transverse de D puisque le flux magnétique est cantonné à la section transverse de C.

### Exercices

1. La densité de flux d'un champ magnétique homogène augmente linéairement en 2 secondes de 0 T à 0,3 T. Une bobine plate de 200 tours se trouve dans le champ. La surface de la bobine est parallèle aux surfaces de champ du champ magnétique, la surface est de 8 cm<sup>2</sup>. Quelle est la tension qui est créée entre les connexions de la bobine ?
2. La densité de flux d'un champ magnétique homogène change au fil du temps comme illustré sur la Fig. 3.10. Un anneau métallique fermé se trouve dans le champ. Esquissez qualitativement l'évolution temporelle du courant électrique dans l'anneau dans un diagramme  $I-t$ .
3. À l'intérieur d'une grande bobine d'une longueur de 0,5 m et de 2000 tours, il y a une petite bobine plate avec  $n = 500$  et  $A = 15$  cm<sup>2</sup>. Les deux bobines ont la même orientation. (a) Calculez l'intensité du champ magnétique dans la grande bobine lorsqu'un courant électrique de 10 A circule. (b) Calculez la densité du flux magnétique. (c) En combien de temps le courant électrique dans la grande bobine doit-il passer de 0 A à 10 A pour qu'une tension de 100 V soit induite dans la petite bobine ?
4. Dans une bobine longue et mince dont la section transverse est de 2 cm<sup>2</sup>, la densité de flux augmente de 0,2 T/s, Fig. 3.11. La bobine est entourée d'un anneau qui n'est pas un bon conducteur. La résistance de l'anneau est de 200 Ω. Quelle est l'intensité du courant induit dans l'anneau ?

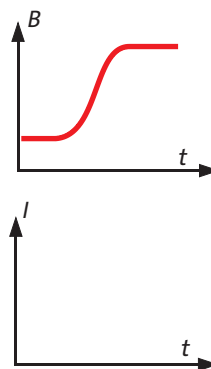


Fig. 3.10 Pour l'exercice 2

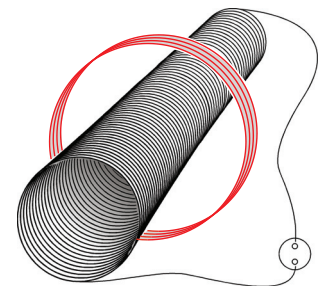


Fig. 3.11 Pour l'exercice 4



## Le générateur

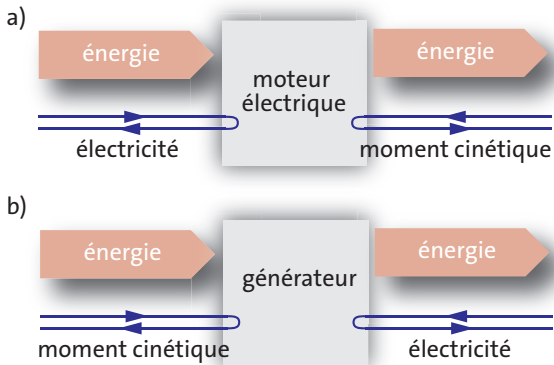


Fig. 3.12 Diagrammes de courant d'énergie du moteur et du générateur électriques

## 3.3 Le générateur

Le générateur est une machine qui fait partie de toutes les centrales électriques. Il fait le contraire d'un moteur électrique. Alors qu'un moteur électrique est alimenté en énergie par le porteur d'énergie qu'est l'électricité (charge électrique) et libère cette énergie en utilisant le moment cinétique comme porteur, Fig. 3.12a, le générateur est alimenté en énergie par le moment cinétique et la libère par l'électricité, Fig. 3.12b.

Les petits générateurs portent souvent un nom différent : dans les bicyclettes, on les appelle dynamo ; dans les voitures, alternateur.

La structure d'un générateur n'est généralement pas différente de celle d'un moteur électrique. Certains moteurs électriques peuvent même être utilisés directement comme générateurs. Il suffit pour cela de remplacer la source d'énergie électrique par un récepteur d'énergie électrique, par exemple une ampoule électrique. Si l'on tourne l'arbre, la lampe s'allume.

Pour comprendre le fonctionnement, nous examinons une version particulièrement simple d'un générateur : une bobine rectangulaire et plate est mise en rotation dans le champ homogène d'un aimant permanent, Fig. 3.13. Le flux magnétique traversant la bobine change continuellement au cours du processus. On va vouloir calculer comment il change, c'est-à-dire à quoi ressemble la fonction  $\Phi(t)$ . Ensuite, nous pourrions déterminer la tension induite en fonction du temps à l'aide de la loi d'induction de Faraday.

La Fig. 3.14 montre le dispositif en coupe transversale. La longueur d'un côté de la bobine est  $l$ , l'autre  $b$ . Par conséquent, la surface de la bobine  $A_0$  est de

$$A_0 = l \cdot b.$$

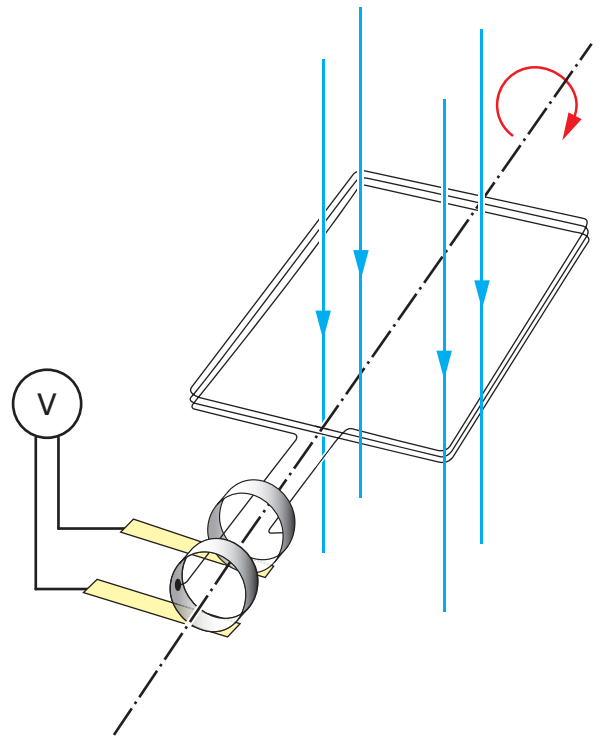


Fig. 3.13 Générateur simple : une bobine plate rectangulaire est mise en rotation dans un champ magnétique homogène. Le flux magnétique à travers la bobine varie ainsi périodiquement.

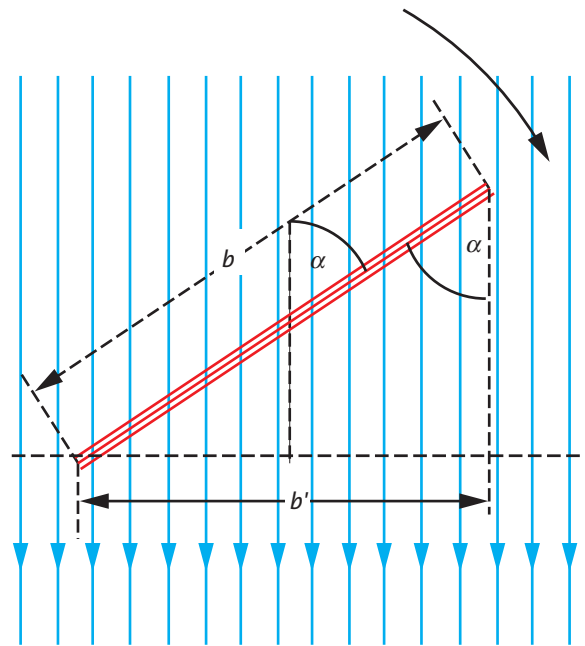


Fig. 3.14 Coupe transversale du dispositif de la Fig. 3.13. Le flux magnétique à travers la bobine est calculé en projetant la surface de la bobine sur un plan perpendiculaire aux lignes de champ.

Sur la Fig. 3.14 on ne peut voir que  $b$ .

La bobine est entraînée en rotation avec la vitesse angulaire

$$\omega = \frac{\alpha}{t}$$

L'angle  $\alpha$  doit être exprimé en radian, c'est-à-dire que la valeur pour un cercle complet est de  $2\pi$ . La vitesse angulaire est constante dans le temps. Par conséquent,  $\alpha$  augmente linéairement avec le temps :

$$\alpha = \omega \cdot t. \quad (3.7)$$

Pour calculer le flux magnétique

$$\Phi = B \cdot A$$

nous ne pouvons pas ici utiliser directement l'aire  $A_0$  de la bobine. La surface qui est traversée par le flux magnétique n'est que la projection de cette surface sur un plan perpendiculaire aux lignes de champ du champ magnétique. Cette projection change avec le temps. Elle atteint son maximum lorsque la bobine est perpendiculaire aux lignes de champ. Elle est nulle lorsque la bobine est parallèle aux lignes de champ.

A partir de la Fig. 3.14, nous pouvons voir comment calculer cette surface. Avec

$$\sin \alpha = \frac{b'}{b}$$

nous obtenons :

$$A = l \cdot b' = l \cdot b \cdot \sin \alpha = A_0 \cdot \sin \alpha.$$

Avec l'équation (3.7), nous avons :

$$A(t) = A_0 \cdot \sin(\omega t).$$

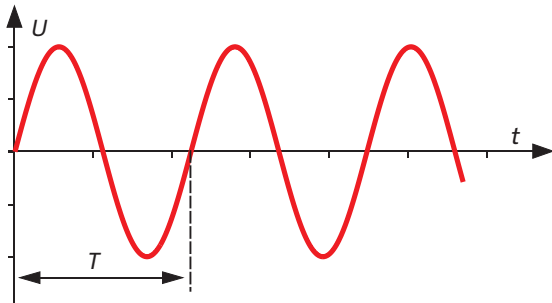


Fig. 3.15 Tension en fonction du temps pour le générateur de la Fig. 3.13.

Nous obtenons ainsi le flux magnétique en fonction du temps :

$$\Phi(t) = B \cdot A_0 \cdot \sin(\omega t). \quad (3.8)$$

Le flux magnétique à travers la bobine varie donc avec le temps selon la fonction sinus. Pour calculer la tension induite, nous insérons l'équation (3.8) dans la loi d'induction de Faraday :

$$U(t) = n \cdot \frac{d\Phi}{dt} = n \cdot B \cdot A_0 \cdot \frac{d(\sin(\omega t))}{dt}.$$

Avec

$$\frac{d(\sin(\omega t))}{dt} = \omega \cdot \cos(\omega t)$$

nous obtenons

$$U(t) = n \cdot B \cdot A_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t).$$

Nous regroupons les facteurs constants devant la fonction cosinus en posant :

$$U_0 = n \cdot B \cdot A_0 \cdot \omega$$

et obtenons pour la tension induite :

$$U(t) = U_0 \cdot \cos(\omega t).$$

Dans notre calcul, nous avons obtenu une fonction cosinus. Cependant, on peut la transformer en une fonction sinus en déplaçant le point zéro du temps. On obtiendrait alors :

$$U(t) = U_0 \cdot \sin(\omega t).$$

La Fig. 3.15 montre la tension en fonction du temps.

Les générateurs industriels réels ont une structure plus complexe que celle que nous venons de voir. Le principe physique sous-jacent est cependant le même que celui de notre générateur à bobine rectangulaire. Et la raison pour laquelle ils génèrent une tension sinusoïdale est également la même.

### Exercices

1. Inventez un générateur qui crée une tension dont le signe plus/moins ne change pas.
2. La tension sinusoïdale restera-t-elle une tension sinusoïdale si la bobine rotative n'est pas rectangulaire mais circulaire ?
3. La tension sinusoïdale restera-t-elle une tension sinusoïdale si le champ magnétique n'est pas homogène ?

### 3.4 Tension alternative et courant alternatif

Une tension qui a une dépendance temporelle sinusoïdale est appelée *tension alternative*. Si une tension alternative est appliquée à une résistance, il y aura un *courant alternatif*.

Avec

$$U = R \cdot I$$

nous obtenons

$$I(t) = \frac{U_0 \cdot \sin(\omega t)}{R} = I_0 \cdot \sin(\omega t).$$

Ici, nous avons remplacé  $U_0/R$  par  $I_0$ . Le facteur devant la fonction sinus (ou cosinus) est appelé *amplitude*. Ainsi,  $U_0$  est l'amplitude de la tension,  $I_0$  est l'amplitude du courant.

La Fig. 3.15 montre également la période  $T$ . C'est l'intervalle de temps nécessaire pour une oscillation sinusoïdale complète. Pour  $t = 0$ , la fonction sinus a un passage par zéro, pour  $t = T$  elle en a un autre, après avoir effectué une oscillation complète. Par conséquent, la période est l'intervalle de temps entre deux points adjacents du temps qui sont équivalents l'un à l'autre. Pour  $t = T$ , l'argument de la fonction sinus est égal à  $2\pi$ . Par conséquent, nous obtenons

$$\omega T = 2\pi$$

ou

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (3.9)$$

La fréquence  $f$ , qui est une mesure du nombre d'oscillations par unité de temps, est liée à la période par

$$f = \frac{1}{T}. \quad (3.10)$$

Les relations (3.9) et (3.10) peuvent se combiner en

$$\omega = 2\pi f.$$

Par conséquent, le facteur  $\omega$  de l'argument de la fonction sinus est égal à la fréquence, à un facteur  $2\pi$  près. Comme ce facteur est très souvent utilisé en physique, il a un nom propre : la *fréquence angulaire*.

Voici encore quelques données sur la tension alternative de la prise de courant électrique. Vous savez que la fréquence est de 50 Hertz (60 Hz aux États-Unis) :

$$f = 50 \text{ Hz}$$

Par conséquent, la tension alternative effectue 50 oscillations complètes chaque seconde.

L'un des deux contacts de la prise est mis à la terre, son potentiel  $\varphi_1$  est de 0 V, le fil correspondant est appelé *conducteur neutre*.

On obtient donc

$$U = \varphi_2 - \varphi_1 = \varphi_2 - 0 \text{ V} = \varphi_2.$$

Ainsi, la valeur de la tension est égale à la valeur du potentiel du contact de la prise qui n'est pas mis à la terre.

La tension de la prise de courant est, comme on le sait, de 230 V (120 V aux États-Unis). Ou du moins, c'est ce qu'on dit qu'elle est. Mais que signifient ces 230 V lorsque la tension change constamment ? Pour comprendre la signification de cette information, nous examinons une résistance électrique, c'est-à-dire un consommateur d'énergie qui est connecté à une source de tension alternative.

Le courant d'énergie qui circule dans la résistance est le suivant :

$$\begin{aligned} P &= U(t) \cdot I(t) = U_0 \cdot \sin(\omega t) \cdot I_0 \cdot \sin(\omega t) \\ &= U_0 \cdot I_0 \cdot \sin^2(\omega t) \end{aligned}$$

Le courant d'énergie varie lui aussi dans le temps. Le graphique de la fonction de  $P(t)$  est présenté à la Fig. 3.16. La Fig. 3.16a montre à nouveau la tension. La fonction  $P(t)$  a essentiellement la même forme que la fonction sinus de la tension, mais elle oscille

- entre 0 et +1, au lieu de -1 et +1
- deux fois plus vite.

En cours de maths, vous avez appris la relation

$$\sin^2 \alpha = \frac{1 - \cos(2\alpha)}{2}.$$

Le fait que le courant d'énergie  $P(t)$  reste toujours positif peut être facilement compris en termes physiques : il s'écoule toujours vers la résistance, que le courant électrique circule dans un sens ou dans l'autre.

Intéressons-nous maintenant à la moyenne temporelle  $\bar{P}$  du courant d'énergie.

D'après la Fig. 3.16, nous voyons :

$$\bar{P} = \frac{U_0 \cdot I_0}{2}.$$

Définissons la *tension effective* (ou tension quadratique moyenne) :

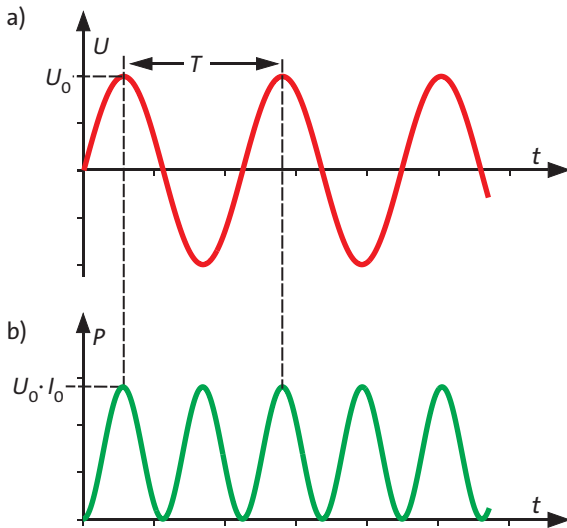


Fig. 3.16 (a) Tension alternative, appliquée à une résistance ; (b) Courant d'énergie circulant dans la résistance ; tous deux en fonction du temps.

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} ;$$

et aussi le *courant effectif* (ou courant quadratique moyen) :

$$I_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{eff}}}{R} = \frac{U_0}{R \cdot \sqrt{2}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} .$$

et exprimons alors le courant d'énergie moyen avec  $U_{\text{eff}}$  et  $I_{\text{eff}}$  :

$$\bar{P} = \frac{U_0 \cdot I_0}{2} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_0}{\sqrt{2}} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} .$$

En multipliant  $U_{\text{eff}}$  et  $I_{\text{eff}}$ , on obtient le courant d'énergie moyen. Cela signifie que  $U_{\text{eff}}$  et  $I_{\text{eff}}$  peuvent être utilisés de la même manière qu'une tension continue et qu'un courant continu, puisque la règle suivante s'applique à eux :

$$\bar{P} = P = U \cdot I$$

Revenons à la prise : les 230 V de la prise sont la tension effective. De même, la valeur affichée par le volt-mètre lors de la mesure d'une tension alternative est la tension effective, et l'ampèremètre indique le courant effectif.

Vous avez vu comment est créée la tension alternative. On pourrait penser qu'une telle tension n'est pas très pratique et qu'il vaudrait mieux la rectifier juste après le générateur ou utiliser un générateur de cou-

rant continu dès le départ. En fait, il existe des générateurs un peu plus compliqués qui fournissent une tension continue.

Le fait que cela ne se fasse pas est dû à un avantage important des tensions alternatives par rapport aux tensions continues : elles peuvent être augmentées et réduites de manière pratique au moyen d'un transformateur.

### Exercices

1. Quelle est la valeur de l'amplitude de la tension alternative de la prise ?
2. Expliquez sur la base de la Fig. 3.16 pourquoi la valeur moyenne de  $P$  est égale à  $U_0 \cdot I_0 / 2$ .
3. Quelqu'un pense que la valeur moyenne de l'intensité du courant d'énergie  $P$  est égale au produit de la valeur moyenne de la tension  $U$  et de la valeur moyenne du courant électrique  $I$ . Est-ce exact ?

## 3.5 Le transformateur

Le téléviseur, l'ordinateur et tout autre appareil électronique nécessitent une tension beaucoup plus faible que le 230 V de la prise. Pour pouvoir brancher ces appareils, la tension doit être transformée de 230 V en une valeur inférieure. Pour ce faire, un transformateur est installé entre l'appareil et la prise.

Pour transporter l'énergie électrique sur de longues distances, il est raisonnable d'utiliser une tension élevée. Les pertes d'énergie pendant le transport sont plus faibles que dans le cas d'une basse tension. C'est pourquoi un transformateur, qui fait passer la tension à une valeur plus élevée, est installé directement derrière le générateur. L'énergie est ainsi transportée sur une longue distance par une ligne électrique à haute tension. À destination, la tension est à nouveau réduite par un autre transformateur.

Bien entendu, aucune énergie ne doit être perdue dans le transformateur, ce qui est pratiquement le cas.

Par conséquent, nous avons

$$P_1 = P_2 .$$

L'indice 1 correspond à l'entrée, l'indice 2 à la sortie du transformateur.

Avec

$$P = U \cdot I$$

nous avons

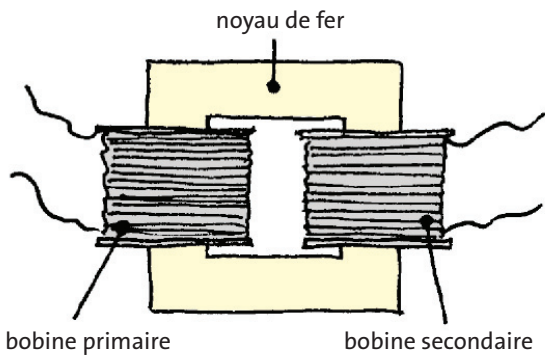


Fig. 3.17 Un transformateur est constitué d'un noyau en fer doux et de deux bobines.



Fig. 3.18 « Transformateur » sans bobine secondaire. Si un courant alternatif circule dans la bobine (primaire), la magnétisation dans le noyau de fer change selon une fonction sinusoïdale.

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2. \quad (3.11)$$

Lorsque le transformateur augmente la tension d'un facteur donné, le courant sera plus faible du même facteur. Si la tension est multipliée par dix, le courant électrique sera d'un dixième, de sorte que le courant d'énergie reste égal.

Comment fonctionne un transformateur ? Le phénomène, dont on tire parti dans ce cas également, est l'induction.

Un transformateur est constitué d'un noyau de fer avec deux bobines, Fig. 3.17. Les bornes de la *bobine primaire* constituent l'entrée de l'énergie, les bornes de la *bobine secondaire* constituent la sortie.

Examinons tout d'abord un « transformateur » qui ne possède pas de bobine secondaire, Fig. 3.18. Cette structure peut également être considérée comme un électro-aimant dans lequel, inopinément, aucun entre-

fer n'a été aménagé dans le noyau de fer ; comparez avec la Fig. 2.42.

Si la bobine (primaire) est connectée à une source de tension alternative, un courant alternatif circule dans la bobine. Cela conduit à une magnétisation du noyau de fer. La magnétisation suit le courant électrique dans le processus : elle change périodiquement de sens. Nous ajoutons à nouveau la bobine secondaire. Tant qu'un courant alternatif circule dans la bobine primaire, l'aimantation à l'intérieur de la bobine secondaire change constamment, tout comme la densité du flux magnétique, ce qui entraîne la création d'une tension entre les bornes de la bobine secondaire. Lorsqu'il y a une tension sinusoïdale sur la bobine primaire, la tension induite sur la bobine secondaire a également une dépendance temporelle sinusoïdale.

Comment peut-on alors élever ou réduire une tension au moyen d'un transformateur ? La valeur de la tension induite dépend du nombre de tours des deux bobines. Nous allons examiner de quelle façon.

Par conséquent, construisons des transformateurs avec des bobines ayant des nombres de tours différents. Nous constatons d'abord que, lorsque le nombre de spires des bobines primaire et secondaire est égal, les tensions primaire et secondaire sont également égales. Si la bobine secondaire a deux fois plus de tours que la bobine primaire, la tension secondaire est également deux fois plus élevée que la tension primaire. En général, nous avons :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Avec l'équation (3.11) nous obtenons

$$n_1 \cdot I_1 = n_2 \cdot I_2.$$

### Exercices

1. Les deux bobines d'un transformateur ont respectivement 1000 et 5000 tours. Il y a une tension alternative de 230 V. Quelles tensions peuvent être créées avec le transformateur ?
2. La bobine primaire d'un transformateur est connectée à la prise. Une tension de 11,5 V est mesurée à la bobine secondaire. Que peut-on dire du nombre de tours des bobines du transformateur ? Il y a un courant électrique de 2 A dans le circuit secondaire. Quel est le courant dans le circuit primaire ?
3. Un transformateur possède une bobine primaire de 1000 tours et une bobine secondaire de 10 000 tours. La bobine primaire est connectée à la prise. Le courant primaire est de 100 mA. Quelles sont les valeurs de la tension secondaire et du courant secondaire ?

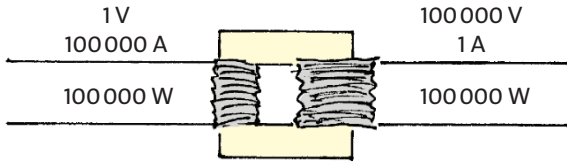


Fig. 3.19 Pour l'exercice 4

**Exercices**

4. Le transformateur de la Fig. 3.19 est parcouru par un courant d'énergie de 100 kW. Quelles sont les exigences en ce qui concerne les entrées et les sorties ?
5. Une centrale électrique fournit un courant énergétique de 60 MW pour une zone industrielle. La ligne de transmission a une résistance globale (ligne d'alimentation et ligne de retour) de  $0,1 \Omega$ . Examinez deux cas : la tension utilisée pour la transmission est (1) de 3000 V ou (2) de 300 000 V.
  - (a) Quel est le courant électrique dans les deux cas ?
  - (b) Quelle tension est créée entre le début et la fin des fils ?
  - (c) Quelle tension reste-t-il pour le consommateur ?
  - (d) Quelle quantité d'énergie est perdue ?

### 3.6 Un générateur quelque peu particulier – « courants magnétiques »

Nous avons besoin d'un tuyau en cuivre et d'un aimant puissant en forme de barre dont le diamètre extérieur est un peu plus petit que le diamètre intérieur du tuyau.

Nous tenons le tuyau en position verticale et laissons de petits objets tomber à travers. De cette façon, nous pouvons voir que le tuyau n'est pas obstrué. Nous lâchons ensuite l'aimant dans l'ouverture supérieure du tuyau, Fig. 3.20. Étonnamment, l'aimant ne tombe pas dans le tuyau de façon normale. Bien qu'il apparaisse finalement à l'extrémité inférieure du tuyau, sa descente a pris beaucoup de temps.

Alors que les objets non magnétiques sortent à grande vitesse, c'est-à-dire avec beaucoup d'énergie (provenant du champ gravitationnel), l'aimant n'a pratiquement aucune énergie cinétique. Pourquoi tombe-t-il si lentement ? Où est passée l'énergie qu'il devrait normalement avoir ?

Pendant qu'il descend dans le tuyau, le champ magnétique change dans le matériau du tuyau. Par conséquent, un courant électrique est induit dans le cuivre. Les lignes de courant correspondantes sont des cercles

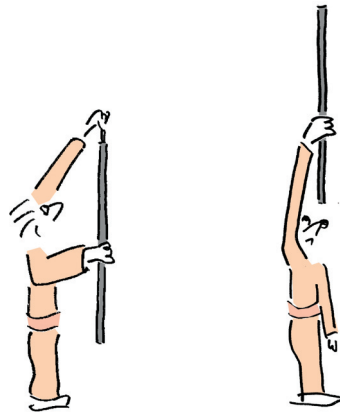


Fig. 3.20 A gauche : Willy laisse tomber un aimant dans un tuyau de cuivre ouvert ; à droite : il faut un certain temps pour que l'aimant ressorte au fond.

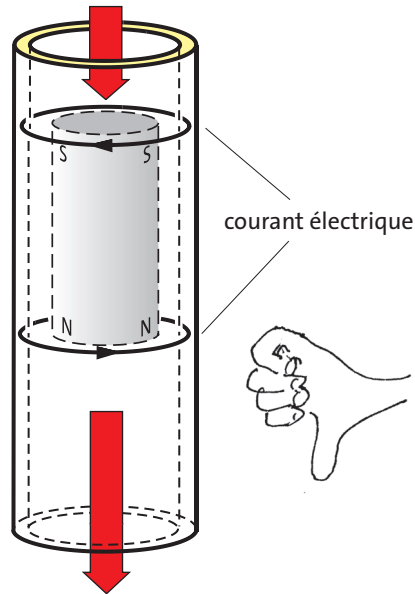


Fig. 3.21 Le pouce de la main gauche pointe dans la direction du mouvement du pôle magnétique positif (la direction du « courant magnétique »), les doigts fléchis indiquent la direction du courant induit.

autour de l'axe du tuyau. Le courant ne circule que là où le champ magnétique change, c'est-à-dire dans le voisinage des pôles. Il y a donc un courant électrique près d'un pôle et un autre près de l'autre pôle.

Le courant près du pôle magnétique positif (le pôle nord) circule dans une direction, le courant près du pôle négatif dans l'autre direction. Il existe une règle simple pour la direction de ce courant, Fig. 3.21 : lorsque le pouce de la main gauche pointe dans la direction du déplacement du pôle positif, les doigts



## Supraconducteurs

fléchis indiquent la direction du courant électrique induit. Attention ! Vous devez vraiment utiliser votre main gauche (ce n'est pas une erreur d'impression).

Nous pouvons reformuler cette règle pour la rendre plus facile à mémoriser.

Lorsqu'un courant circule dans le tuyau de cuivre, il doit y avoir un champ électrique dans le tuyau. Nous nous souvenons de la relation suivante :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

Un courant électrique ne circule que si l'intensité du champ électrique est différente de zéro. Le champ électrique est une force motrice pour le courant électrique.

On pourrait dire aussi :

Un champ magnétique variable crée un champ électrique.

Cette phrase n'est rien d'autre qu'une nouvelle formulation de la loi d'induction de Faraday.

Enfin, il existe une troisième façon de décrire le phénomène : une charge magnétique se déplace du haut vers le bas. Tout comme nous décrivons une charge électrique en mouvement comme un courant électrique, nous pourrions interpréter la charge magnétique en mouvement comme un courant magnétique. Par conséquent, nous pourrions également formuler la règle comme suit :

Tout courant magnétique est environné d'un champ électrique. Les lignes de champ entourent le courant. Lorsque le pouce de la main gauche pointe dans la direction du courant magnétique, les doigts fléchis pointent dans la direction du champ électrique.

Normalement, nous ne parlons pas de courants magnétiques ; nous disons même qu'il n'y a pas de courants magnétiques du tout, car les particules chargées magnétiquement n'existent pas. Toutefois, cette affirmation peut être atténuée comme le montre notre exemple : il y a un courant magnétique pendant un court instant. Mais peu de temps après, il y a un courant magnétique de sens opposé : le pôle magnétique négatif, qui se déplace vers le bas, est équivalent à un courant positif qui se déplace vers le haut. On peut donc dire aussi qu'après chaque courant magnétique, il y a un courant qui circule dans le sens opposé. Cela signifie que, bien qu'il n'existe pas de courant magnétique continu, il existe des courants magnétiques alternatifs.

matériau	température de transition
Zn	0,875 K
Al	1,2 K
Pb	7,2 K
Nb <sub>3</sub> Sn	18 K
Nb <sub>3</sub> Ge	22,3 K
Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	110 K
YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7</sub>	92 K

Tab. 3.3

## 3.7 Supraconducteurs

Il existe des matériaux qui perdent leur résistance électrique lorsqu'ils sont refroidis en dessous d'une certaine température (Tab. 3.3). Dans leur état non-résistif, ces matériaux sont appelés supraconducteurs (ou superconducteurs). La température de transition de l'état normal à l'état supraconducteur est relativement élevée pour certaines de ces substances : environ  $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ces substances peuvent être amenées à l'état supraconducteur relativement facilement en les refroidissant avec de l'azote liquide.

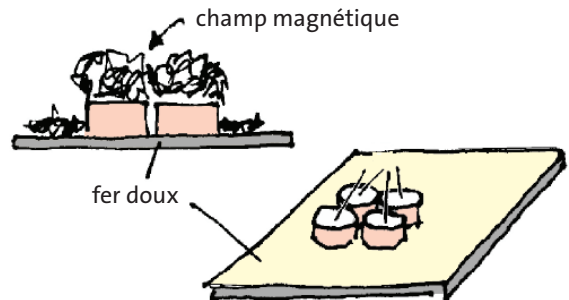


Fig. 3.22 Plusieurs aimants sur une plaque de fer doux

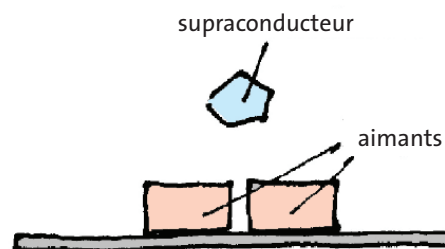


Fig. 3.23 Le supraconducteur est maintenu en lévitation par le champ magnétique.

Mais les supraconducteurs ne sont pas seulement intéressants parce qu'ils n'ont pas de résistance électrique. Ils ont également des propriétés magnétiques surprenantes.

Imaginons un montage d'aimants permanents comme sur la Fig. 3.22.

Approchons un petit morceau de matériau supraconducteur en haut des aimants et laissons-le tomber. Le supraconducteur ne tombe pas, mais il flotte au-dessus des aimants, Fig. 3.23. Il peut être tourné ou poussé légèrement sur le côté : il restera en lévitation (bien sûr seulement jusqu'à ce qu'il se réchauffe et revienne à l'état normal).

A l'évidence, le supraconducteur est repoussé par les aimants. Il se comporte donc à l'inverse d'un morceau de fer doux qui est toujours attiré. Comment expliquer ce phénomène ? Lorsque le supraconducteur s'approche d'un aimant, des courants commencent à y circuler, orientés de manière à provoquer des effets répulsifs. Dans un corps normalement conducteur (c'est-à-dire non supraconducteur), ces courants induits cesseraient très vite de circuler, ils seraient ralentis par la résistance du matériau. Dans le supraconducteur, les courants une fois induits continuent de circuler car il n'y a pas de résistance qui pourrait les ralentir.

Un examen plus précis, que nous ne ferons pas à ce stade, montre

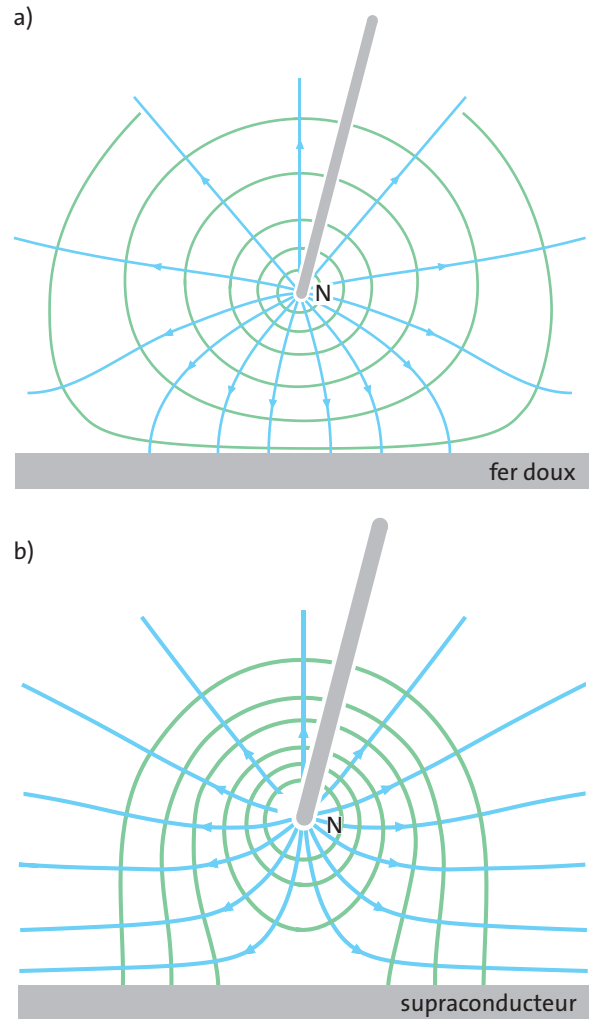
- que les courants ne circulent que dans une très faible épaisseur proche de la surface du supraconducteur ;
- que le champ magnétique ne pénètre pas dans le volume du supraconducteur ;
- que les surfaces de champ arrivent de l'extérieur perpendiculairement au supraconducteur.

Si un supraconducteur est introduit dans un champ magnétique, des courants électriques commencent à circuler à sa surface. Le champ est repoussé à l'extérieur.

Les surfaces du champ arrivent perpendiculairement à la surface et s'arrêtent à la surface.

Ces affirmations vous semblent-elles familières ? Retournez à la section 2.6. Les supraconducteurs ont des propriétés très similaires aux caractéristiques des matériaux magnétiques doux. Tout comme les matériaux magnétiques doux, les supraconducteurs ne sont pas perméables au champ magnétique. Mais ils obtiennent le même effet par une autre « astuce » que les matériaux magnétiques doux : non pas en formant des pôles magnétiques, mais en induisant des courants électriques.

La Fig. 3.24 montre les champs de deux configurations apparentées :



**Fig. 3.24** (a) Un seul pôle magnétique au-dessus d'un corps en fer doux. Un autre pôle magnétique s'est formé sur la face supérieure du fer doux. (b) Un seul pôle magnétique au-dessus d'un supraconducteur. Des courants électriques en forme d'anneau se sont développés sur la surface du supraconducteur.

- dans l'image du haut, un pôle magnétique situé juste au-dessus de la surface plane d'un corps magnétiquement doux ; (le second pôle magnétique est si éloigné qu'il ne nous dérange pas) ;
- dans l'image du bas, un pôle magnétique au-dessus d'un corps supraconducteur.

Une charge magnétique s'est accumulée à la surface du fer doux. La distribution de la charge présente une symétrie de révolution. Le centre de symétrie et le maximum de la distribution des charges sont situés

matériau magnétique doux	matériau supraconducteur
repousse le champ magnétique vers l'extérieur	repousse le champ magnétique vers l'extérieur
forme des pôles magnétiques à sa surface (induction magnétique)	forme des courants électriques à sa surface
les lignes de champ magnétique se terminent sur les pôles	les surfaces de champ magnétique se terminent sur les courants
les lignes de champ magnétique arrivent perpendiculairement sur la surface	les surfaces de champ magnétique arrivent perpendiculairement sur la surface
Le champ magnétique attire la surface	le champ magnétique repousse la surface

Tab. 3.4 Analogie entre les matériaux magnétiques doux et les matériaux supraconducteurs

verticalement sous le pôle magnétique. Les lignes de champ se terminent au niveau des charges magnétiques de manière à être perpendiculaires à la surface. Par conséquent, le pôle magnétique attire le morceau de fer doux.

Des courants en forme d'anneaux sont apparus à la surface du supraconducteur. Le centre des anneaux est situé sous le pôle magnétique. Les surfaces du champ se terminent sur ces courants de manière à être perpendiculaires à la surface. Par conséquent, le champ magnétique repousse le supraconducteur.

Le champ magnétique repousse la surface du supraconducteur.

Le tableau 3.4 donne un aperçu comparatif des deux matériaux.

### Exercices

- Un aimant cylindrique en forme de barre est situé dans un long tube supraconducteur, Fig. 3.25a. Dessinez les lignes du champ magnétique. Dans la Fig. 3.25b, l'anneau s'insère exactement dans le tuyau. Comment sont les lignes de champ magnétique ? Quels sont les courants électriques qui circulent dans le tuyau ?
- Willy, Fig. 3.20, veut faire tomber l'aimant en forme de barre dans un tuyau supraconducteur. Que se passe-t-il ?

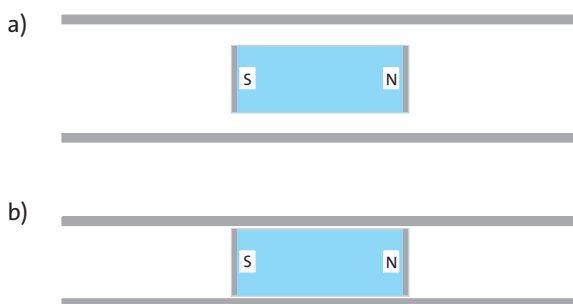


Fig. 3.25 Pour l'exercice 1

## 3.8 Champs électriques induits – l'interaction entre champs électrique et magnétique

Reprenons les bases de l'induction électromagnétique et considérons le processus d'induction représenté sur la Fig. 3.26. Le champ magnétique variable génère un courant électrique dans le conducteur fermé en forme d'anneau.

Un courant électrique est toujours dû à un champ électrique qui entraîne les porteurs de charge mobiles dans la direction du conducteur. Si c'est également le cas pour un courant induit, un champ électrique doit avoir été créé dans le conducteur. Nous en tirons la conclusion suivante :

La variation de l'intensité d'un champ magnétique conduit à la création d'un champ électrique dans son voisinage.

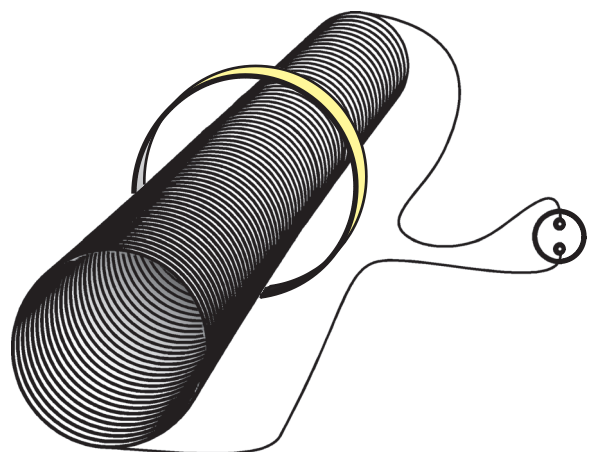


Fig. 3.26 Le champ magnétique variable génère un courant électrique dans le conducteur électrique en forme d'anneau.

Cette affirmation n'est pas seulement valable dans le cas où un conducteur électrique est introduit dans le champ magnétique. Elle est également vraie lorsque le conducteur n'est pas présent. Chaque fois qu'un champ magnétique change, un champ électrique est créé.

En général, le calcul de la distribution de l'intensité du champ électrique d'un tel champ est une tâche compliquée. Mais dans le cas de certaines variations simples du champ magnétique, il y aura également un champ électrique simple. La Fig. 3.27 montre un électro-aimant dont le courant augmente de sorte que la densité de flux augmente également et qu'un champ électrique est induit. La figure montre les lignes de densité de flux et les lignes de champ du champ électrique induit.

Les lignes de champ du champ électrique forment une boucle autour des lignes de densité de flux.

Vous vous êtes maintenant habitué à l'analogie entre le champ électrique et le champ magnétique. Vous ne serez donc pas surpris que la phrase que nous considérons actuellement ait également une analogie :

En faisant varier un champ électrique, on crée un champ magnétique dans son environnement.

La preuve expérimentale directe de cette affirmation n'est pas aussi simple que dans le cas précédent concernant la variation du champ magnétique. Cependant, il existe de nombreuses preuves indirectes que nous allons aborder dans ce qui suit. La Fig. 3.28 montre comment se présente le champ magnétique dans un cas simple.

Un courant électrique circule dans le conducteur. Tant que le courant circule, la charge électrique sur les plaques du condensateur augmente et entraîne une augmentation de l'intensité du champ électrique entre les plaques du condensateur. Ici, les lignes de champ du champ magnétique s'enroulent autour des lignes de champ du champ électrique. Nous avons vu précédemment que les fils de connexion du condensateur à la batterie sont également entourés d'un champ magnétique dont les lignes de champ s'enroulent autour du conducteur. Vous voyez que le champ magnétique se comporte comme si nous avions devant nous un circuit électrique fermé. L'interruption du circuit par le condensateur n'a aucune influence sur le champ magnétique.

Une règle simple peut être tirée de la Fig. 3.28. Il s'agit d'une variante d'une règle bien connue : « alignez le pouce de votre main droite avec la direction du courant électrique. Les doigts fléchis pointeront alors dans la direction des lignes de champ du champ magnétique ».

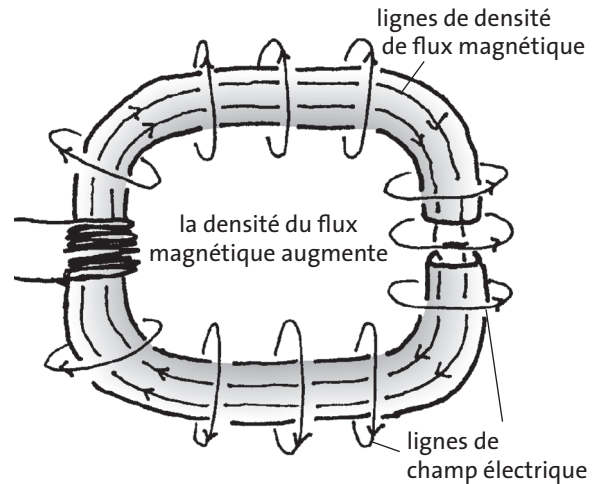


Fig. 3.27 Les lignes de champ électrique forment une boucle autour des lignes de champ magnétique variables et des lignes de magnétisation variables.

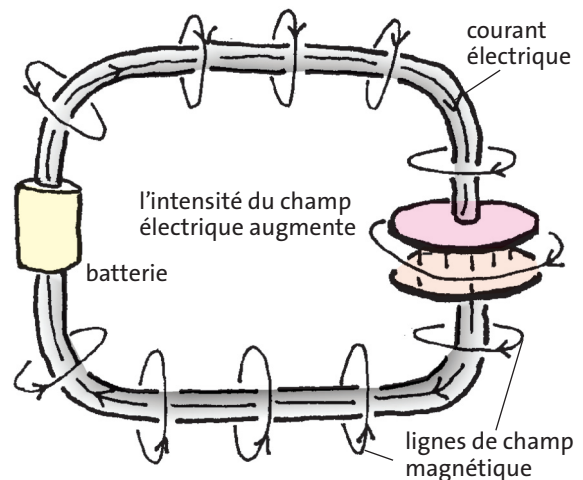


Fig. 3.28 Les lignes de champ magnétique forment une boucle autour des lignes de champ électrique variables et du courant électrique.

La Fig. 3.28 montre comment la nouvelle règle peut être formulée :

Alignez le pouce de la main droite dans la direction du champ électrique croissant. Les doigts fléchis pointeront alors dans la direction des lignes de champ du champ magnétique.

La Fig. 3.27 montre qu'une règle analogue s'applique à l'induction, c'est-à-dire à la création de champs électriques :

Alignez le pouce de la main gauche dans la direction du flux magnétique croissant. Les doigts fléchis pointeront alors dans la direction des lignes de champ du champ électrique.

Gardez à l'esprit que vous devez utiliser la main droite dans un cas et la main gauche dans l'autre, et que l'intensité du champ doit augmenter. Si elle diminue, la direction du pouce doit être inversée pour que les doigts fléchis indiquent les directions correctes des lignes de champ.

Le calcul de la distribution spatiale et de la variation temporelle des vecteurs intensité du champ électrique et intensité du champ magnétique fait appel à la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell.

James Clerk Maxwell a publié sa théorie en 1873. Il s'agit de l'une des théories physiques les plus importantes. Elle permet non seulement de calculer la distribution des vecteurs champs électriques et magnétiques, mais elle explique également comment obtenir l'énergie et les contraintes mécaniques des champs à partir des vecteurs champs.

La théorie de Maxwell est principalement dérivée des idées de Michael Faraday. Faraday a découvert, entre autres, l'induction électromagnétique. Sa plus grande réalisation, cependant, a été la découverte du champ électrique et du champ magnétique. Avant Faraday, les effets de la force électrique et magnétique étaient expliqués comme des « actions à distance » : un corps chargé électriquement exerce une force sur un autre corps bien qu'il n'y ait pas de lien physique entre les deux corps. Bien que ce concept ait été considéré comme insatisfaisant dès le début, aucune preuve n'avait été apportée quant à l'existence de ce que Faraday a appelé plus tard « champ ».

### 3.9 Ondes électromagnétiques

Nous en savons assez maintenant pour faire une découverte, si Maxwell ne l'avait pas déjà faite il y a plus de cent ans.

Examinons à nouveau les deux règles que nous avons formulées dans la section précédente :

- 1 Si l'intensité d'un champ magnétique change, un champ électrique est créé dans son voisinage.
- 2 Si l'intensité d'un champ électrique change, un champ magnétique est créé dans son voisinage.

Nous observons un champ magnétique dont l'intensité change. Selon l'affirmation 1, un champ électrique

est créé autour de lui. Lorsque l'intensité du champ magnétique change linéairement avec le temps, l'intensité du champ électrique qui se crée est constante dans le temps. Mais si la variation de l'intensité du champ magnétique n'est pas linéaire dans le temps, il en résulte un champ électrique dont l'intensité varie également.

Selon l'énoncé 2, cependant, une variation de l'intensité du champ électrique entraîne un champ magnétique. La variation de l'intensité du champ magnétique peut maintenant provoquer un autre champ électrique, la variation de son intensité un autre champ magnétique, et ainsi de suite.

Ce que nous venons de décrire est la formation d'une onde électromagnétique.

Les champs électriques et magnétiques se déplacent dans l'espace de telle sorte que l'un crée l'autre tandis qu'il disparaît.

L'apparence des champs, qui se créent mutuellement, peut être très compliquée. Mais il existe des cas dans lesquels la distribution spatiale des vecteurs champs et leurs variations temporelles sont très simples. Nous allons examiner ces cas particuliers.

Par conséquent, nous ne regardons que la forme de l'onde et ne nous demandons pas comment elle est créée. L'explication de la création est plus difficile que l'explication de la vague elle-même. (C'est similaire au fait de regarder les vagues d'eau sur la mer et d'examiner seulement comment les vagues vont d'un endroit à l'autre et comment elles changent de forme au cours du processus sans demander comment les vagues ont été créées).

### 3.10 Ondes carrées

Notre premier exemple est une onde carrée. Il n'est ni techniquement intéressant, ni significatif par nature, mais il a l'avantage d'illustrer de façon particulièrement claire quelques caractéristiques générales des ondes électromagnétiques. La Fig. 3.29 montre l'onde à deux moments différents, c'est-à-dire deux « instantanés ». La substance du champ électrique et magnétique est limitée à une zone en forme de plaque d'épaisseur  $\Delta x$  qui s'étend à l'infini dans les directions  $y$  et  $z$ . Le déplacement de l'onde est dans la direction  $x$ . Les lignes de champ électrique sont perpendiculaires à la direction du déplacement de l'onde, soit la direction  $y$  dans la Fig. 3.29. Les lignes de champ magnétique sont également perpendiculaires à la direction du déplacement mais, en plus, perpendicu-



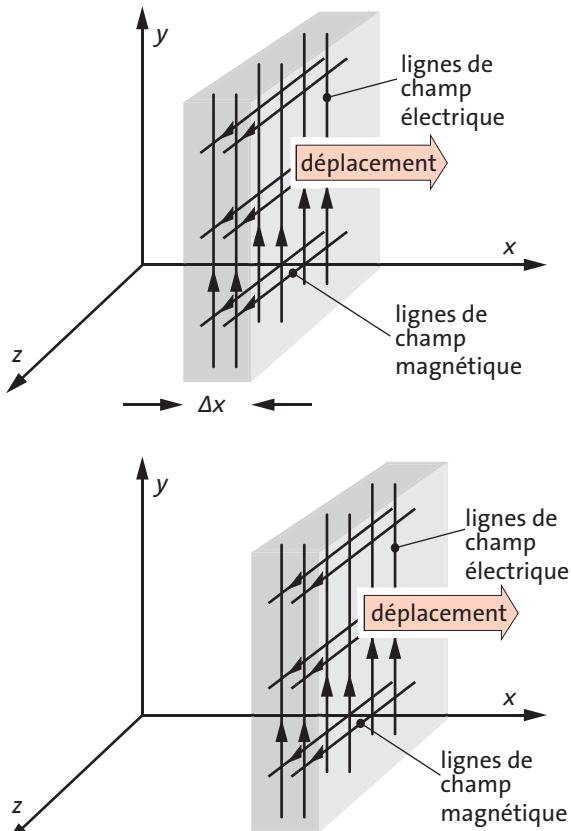


Fig. 3.29 « Instantanés » d'une onde électromagnétique simple. Les images correspondent à deux instants très proches.

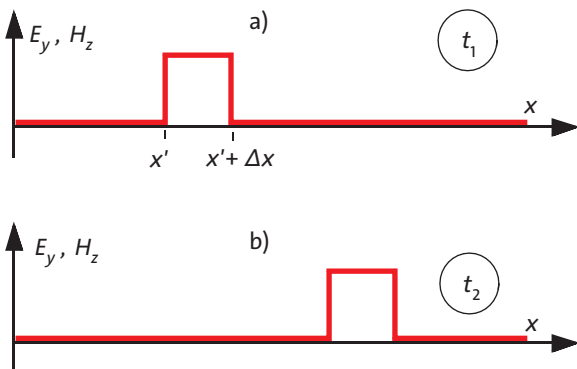


Fig. 3.30 Intensité des champs électrique et magnétique de l'onde de la Fig. 3.30 en fonction de la coordonnée spatiale  $x$  à deux instants différents  $t_1$  et  $t_2$ .

lares aux lignes de champ électrique, soit la direction  $z$  dans la Fig. 3.29.

Observons une droite quelconque parallèle à l'axe des  $x$ . Lorsque nous nous déplaçons sur cette ligne

droite de la gauche vers la droite, nous parcourons d'abord une zone dans laquelle les intensités des champs électrique et magnétique sont nulles. En un point donné  $x'$ , nous entrons à l'intérieur de l'onde où les intensités des champs ont une valeur constante. À la position  $x' + \Delta x$ , les intensités des champs reviennent à zéro. La Fig. 3.30a. montre les intensités des champs en fonction de  $x$ . Plus exactement : la composante  $y$  du vecteur champ électrique (la seule composante différente de zéro) et la composante  $z$  du vecteur champ magnétique. Vous comprenez maintenant pourquoi nous avons choisi le nom de « onde carrée ». Notez que l'image est la même pour chaque ligne droite parallèle à l'axe des  $x$ . La Fig. 3.30b montre l'image de la même onde à un instant ultérieur. Nous voyons sur ces illustrations que les champs se déplacent de la gauche vers la droite.

En tout point d'une onde électromagnétique, la direction du déplacement, le vecteur champ électrique et le vecteur champ magnétique sont perpendiculaires entre eux.

Il existe une autre propriété caractéristique des ondes électromagnétiques : la densité d'énergie du champ électrique est égale à celle du champ magnétique :

$$\frac{\epsilon_0}{2} |\vec{E}|^2 = \frac{\mu_0}{2} |\vec{H}|^2. \tag{3.12}$$

Cela signifie que les modules du champ électrique et du champ magnétique sont liés par une relation particulière. L'équation (3.12) nous permet de conclure :

Dans une onde électromagnétique, nous avons

$$\sqrt{\epsilon_0} |\vec{E}| = \sqrt{\mu_0} |\vec{H}|. \tag{3.13}$$

La célérité des ondes électromagnétiques dans le vide est désignée par  $c$ . Elle est égale à

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}. \tag{3.14}$$

En explicitant les valeurs de la constante électrique et de la constante magnétique, on obtient environ 300 000 km/s.

La célérité d'une onde électromagnétique est de 300 000 km/s.

Cette célérité peut être mesurée assez facilement. Par conséquent, la validité de la relation (3.14) peut être vérifiée à l'aide d'une telle mesure.



### 3.11 Transmission d'énergie avec les ondes électromagnétiques

En étudiant l'onde carrée, nous pouvons encore trouver une autre propriété générale des ondes électromagnétiques. Comment la direction de propagation de l'onde est-elle liée à la direction des vecteurs champs électrique et magnétique ? Nous avons déjà vu qu'elle est orthogonale aux deux — dans la direction de l'axe  $x$  sur la Fig. 3.29. Mais nous ne connaissons pas encore de règle qui nous permette de décider si l'onde se déplace dans la direction  $x$  positive ou négative. Nous aimerions illustrer cette règle sur la Fig. 3.29.

Ecartons les trois premiers doigts (pouce, index et majeur) de la main droite de manière à ce qu'ils forment un trièdre rectangulaire, Fig. 3.31. Alignons le pouce dans la direction du vecteur champ électrique et l'index dans la direction du vecteur champ magnétique. Le majeur pointe alors dans la direction dans laquelle l'onde se propage. C'est également la direction dans laquelle l'énergie de l'onde s'écoule. Ce courant d'énergie est caractérisé par un vecteur appelé vecteur densité de courant d'énergie et noté  $\vec{j}_E$ . Le majeur indique donc la direction du vecteur densité de courant d'énergie.

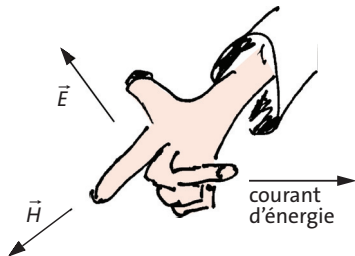


Fig. 3.31 Règle des trois doigts pour le courant d'énergie dans le champ électromagnétique

Règle des trois doigts de la main droite :

- Pouce → vecteur champ électrique
- Index → vecteur champ magnétique
- Majeur → direction du vecteur courant d'énergie de l'onde

Le module du vecteur densité de courant d'énergie est obtenu en multipliant les deux modules des vecteurs champs :

$$|\vec{j}_E| = |\vec{E}| \cdot |\vec{H}| \quad (3.15)$$

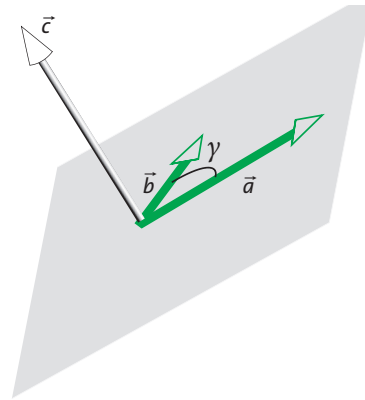


Fig. 3.32 Le produit vectoriel  $\vec{c}$  est perpendiculaire au plan dans lequel se trouvent les vecteurs  $\vec{a}$  et  $\vec{b}$ .

L'équation peut être généralisée pour s'appliquer à d'autres cas que celui où les vecteurs champs électrique et magnétique sont perpendiculaires entre eux. Pour comprendre cette équation plus générale, nous devons connaître une autre définition mathématique : le produit vectoriel, Fig. 3.32.

$$\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$$

Le produit vectoriel est défini par les règles suivantes :  
Direction de  $\vec{c}$  : perpendiculaire au plan dans lequel se trouvent les vecteurs  $\vec{a}$  et  $\vec{b}$ .

Module de  $\vec{c}$  :  $|\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \sin \gamma$   
Ici,  $\gamma$  est l'angle entre  $\vec{a}$  et  $\vec{b}$ .

Pour la densité de courant d'énergie dans le champ électromagnétique, nous avons :

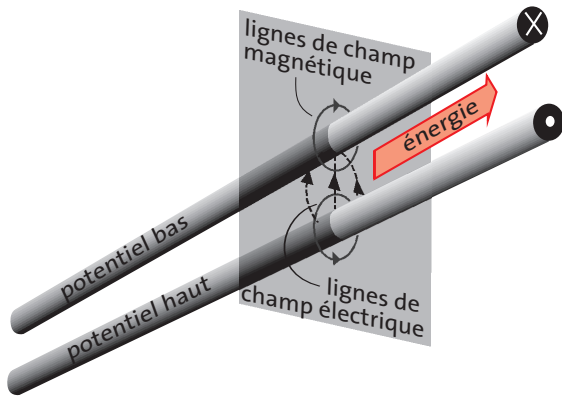
$$\vec{j}_E = \vec{E} \times \vec{H} \quad (3.16)$$

Cette équation ne fournit pas seulement une information sur le module de  $\vec{j}_E$  ; elle nous indique également l'orientation du « vecteur produit vectoriel ».

La formule ne s'applique pas seulement aux champs électromagnétiques que nous appelons « onde » ou « rayonnement » ; elle s'applique à tout champ.

Maintenant, nous pouvons également répondre à une question que nous avons évitée jusqu'à présent.

Où circule exactement l'énergie lorsque nous utilisons un câble bifilaire normal ? Une réponse logique serait : « dans le câble, sinon par où ? » Mais cette réponse n'est pas correcte. La charge électrique circule



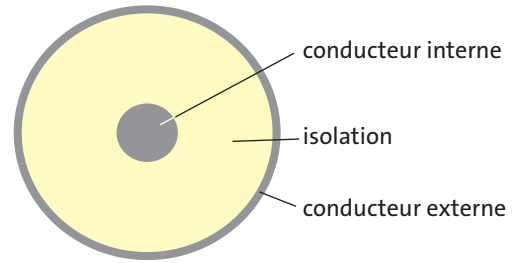
**Fig. 3.33** Ce n'est qu'à l'extérieur des conducteurs que les champs électrique et magnétique sont non nuls ; ce n'est qu'à cet endroit que l'énergie circule.

dans le câble, et les électrons se déplacent dans le câble. Seule l'énergie n'y circule pas. Nous voyons sur la Fig. 3.33 où elle circule.

Lorsqu'un courant électrique circule, il y a un champ magnétique dont les lignes de champ font une boucle autour du conducteur ; et lorsqu'il y a une tension électrique entre les conducteurs, nous avons un champ électrique dont les lignes de champ vont d'un conducteur à l'autre. À l'extérieur des conducteurs, nous avons donc un champ électrique et un champ magnétique. Les lignes de champ de ces deux champs sont situées dans des plans perpendiculaires aux conducteurs. Selon l'équation (3.15) ou (3.16), nous avons donc un courant d'énergie parallèle aux conducteurs.

### Exercices

1. Une station de radio émet une onde électromagnétique de 10 kW. L'antenne est construite de telle manière que le rayonnement ne va que dans une certaine plage angulaire. À une distance de 10 km, le faisceau a une largeur de 2,5 km et une altitude de 1 km. (Ces chiffres ne sont que des indications approximatives. Dans une antenne réelle, l'intensité diminue vers les côtés). Calculez la densité de courant d'énergie en ce point, c'est-à-dire à une distance de 10 km de l'antenne. Calculez l'intensité du champ électrique et du champ magnétique. Comparez avec le courant d'énergie de la lumière du soleil.
2. La Fig. 3.34 montre une vue en coupe d'un câble coaxial : l'un des conducteurs est un fil classique ; l'autre conducteur entoure le fil de façon cylindrique à une certaine distance. Les câbles coaxiaux sont adaptés à la transmission de signaux de courant électrique alternatif à haute fréquence. Le conducteur extérieur est au potentiel de la terre. Dessinez les lignes de champ magnétique et électrique. Où et dans quelle direction l'énergie circule-t-elle ?



**Fig. 3.34** Vue en coupe d'un câble coaxial. Le conducteur extérieur est au potentiel de la terre.

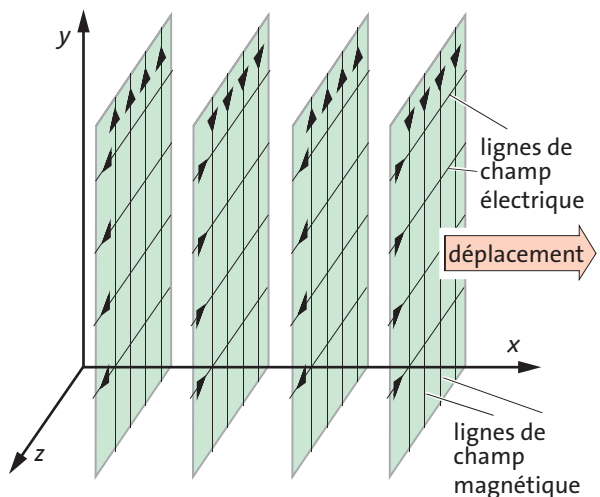
## 3.12 Ondes sinusoïdales

Nous allons examiner un exemple plus réaliste d'onde électromagnétique : l'onde sinusoïdale plane. La Fig. 3.35 montre un « instantané » simplifié d'une onde sinusoïdale qui se déplace dans la direction  $x$ . Ici aussi, les intensités des champs dépendent uniquement de  $x$ , et pas de  $y$  et  $z$ .

La dépendance en  $x$  est illustrée à la Fig. 3.36a. Il s'agit d'une fonction sinusoïdale. Après un court instant, le profil de l'onde sinusoïdale se sera déplacé vers l'avant, Fig. 3.36b. La distance entre deux valeurs maximales ou minimales successives est appelée longueur d'onde  $\lambda$  de l'onde.

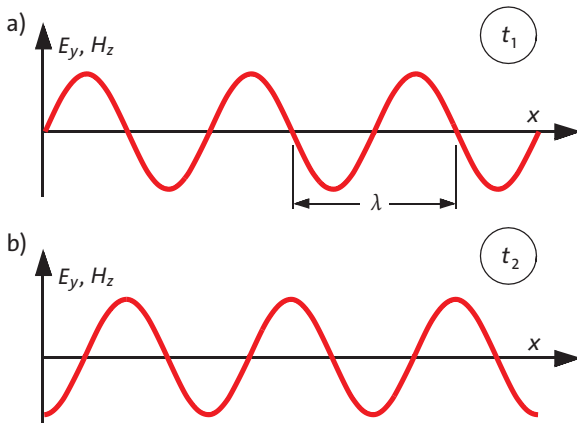
Pour cette onde également, les règles suivantes s'appliquent :

- le vecteur champ électrique, le vecteur champ magnétique et la direction du déplacement sont perpendiculaires entre eux ;



**Fig. 3.35** « Instantané » d'une onde électromagnétique sinusoïdale

## Ondes sinusoïdales

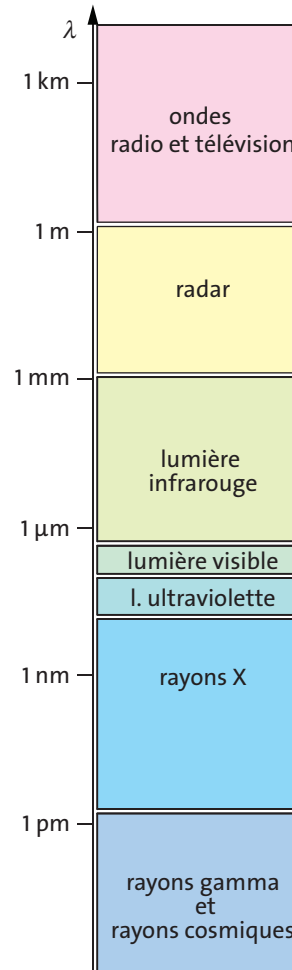


**Fig. 3.36** Intensité des champs électrique et magnétique de l'onde de la Fig. 3.35 en fonction de la coordonnée spatiale  $x$  à deux instants différents  $t_1$  et  $t_2$ .

- les modules des vecteurs champ électrique et champ magnétique sont liés en tout point selon l'équation (3.13) ;
- l'onde se déplace à la vitesse  $c = 300\,000$  km/s.

L'onde est également constituée de zones planes à forte intensité de champ qui se déplacent vers la droite et qui sont séparées les unes des autres par des zones à faible intensité de champ. Comme les zones à forte intensité de champ contiennent également une grande quantité d'énergie, celle-ci est également transportée dans ces « paquets » qui se déplacent vers la droite.

Les ondes électromagnétiques sont omniprésentes dans notre vie, qu'il s'agisse d'un phénomène naturel ou d'ondes créées par des dispositifs techniques. Il est intéressant de constater qu'il existe des ondes électromagnétiques de longueurs d'onde très différentes. Les ondes les plus courtes qui ont été observées, les rayons gamma durs, ont une longueur d'onde de  $10^{-22}$  m. D'autre part, des ondes d'une longueur d'onde allant jusqu'à  $10^4$  m sont utilisées pour la transmission radio. Entre ces deux extrêmes (qui ne sont en fait pas des extrêmes car rien ne nous empêche de produire des ondes encore plus courtes ou encore plus longues), on trouve les rayons X, les ultraviolets, la lumière normale, « visible », le rayonnement infrarouge, les micro-ondes et les ondes utilisées pour la transmission VHF et la télévision, Fig. 3.37.



**Fig. 3.37** Les différentes gammes de longueur d'onde des ondes électromagnétiques

## Constantes physiques et formules

Constantes physiques	
$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ (Vs)/(Am)}$	constante magnétique
$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ (As)/(Vm)}$	constante électrique
$m_{el} = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	masse de l'électron
$e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	charge élémentaire
Énergie et courants d'énergie	
$P = U \cdot I$	courant d'énergie pour un transport d'énergie électrique
$E = \frac{C}{2} U^2, \quad E = \frac{L}{2} I^2$	énergie du champ électrique d'un condensateur / du champ magnétique d'une bobine
$\rho_E = \frac{\epsilon_0}{2}  \vec{E} ^2, \quad \rho_E = \frac{\mu_0}{2}  \vec{H} ^2$	densité d'énergie du champ électrique/magnétique
$\Delta E = (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot \Delta Q$	variation d'énergie d'un corps chargé circulant d'un potentiel à un autre
Courants de quantité de mouvement	
$F = Q \cdot  \vec{E} $	courant de la quantité de mouvement acquise par une particule chargée dans un champ électrique
$F = Q_m \cdot  \vec{H} $	courant de la quantité de mouvement acquise par un pôle magnétique dans un champ magnétique
$F = I \cdot \Delta s \cdot B$	courant de la quantité de mouvement acquise par un conducteur parcouru par un courant électrique dans un champ magnétique
$\sigma_{\perp} = \frac{\epsilon_0}{2}  \vec{E} ^2, \quad \sigma_{\parallel} = -\frac{\epsilon_0}{2}  \vec{E} ^2$	contrainte mécanique dans le champ électrique
$\sigma_{\perp} = \frac{\mu_0}{2}  \vec{H} ^2, \quad \sigma_{\parallel} = -\frac{\mu_0}{2}  \vec{H} ^2$	contrainte mécanique dans le champ magnétique
Calcul des intensités de champ	
$ \vec{E}  = \frac{U}{d}$	Intensité du champ électrique d'un condensateur
$H = I \cdot \frac{n}{\ell}$	Intensité du champ magnétique du champ d'une bobine ( $\ell$ = longueur de la bobine)
$H = \frac{I}{\ell}$	Intensité du champ magnétique d'un fil droit ( $\ell$ = circonférence du cercle autour du fil)

## Constantes physiques et formules

Taux de variation	
$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = I$	le taux de variation de la charge électrique est égal au courant électrique (conservation de la charge électrique)
$n \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = U$	le taux de variation du flux magnétique est égal à la tension induite (loi d'induction de Faraday).
Équations qui caractérisent un composant	
$U = R \cdot I, R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\ell}{A}$	caractérisent une résistance
$Q = C \cdot U, C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$	caractérisent un condensateur
$n \cdot \Phi = L \cdot I, L = n^2 \mu_0 \cdot \frac{A}{\ell}$	caractérisent une bobine
$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$	version locale de la loi d'Ohm
Période	
$T = 2\pi\sqrt{L \cdot C}$	période d'un circuit oscillant