

**Athénée royal du Condroz Jules Delot**  
**Ciney**

# Electricité



**5<sup>ème</sup> générale – 3 périodes/semaine**

**Ir Jacques COLLOT**



# Table des matières

<b>ELECTROSTATIQUE .....</b>	<b>6</b>
<b>1. Savoirs.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Compétences .....</b>	<b>6</b>
<b>3. Electrifications .....</b>	<b>6</b>
3.1 Electrification par frottement .....	6
3.2. Electrification par contact.....	8
3.3 Conducteur et isolant .....	10
3.4 Electrification par influence .....	13
3.5 Autres expériences d'électrostatique .....	15
<b>4. Loi de Coulomb .....</b>	<b>19</b>
4.1 Comparaison des forces électrique et gravitationnelle.....	22
4.2 Etude de stabilité de la molécule H <sub>2</sub> .....	22
4.3 Stabilité d'un noyau d'atome .....	23
<b>5. Notion de champ électrique.....</b>	<b>23</b>
5.1 Le champ de pesanteur ou de gravitation : g .....	23
5.2 Champ électrique : E .....	24
<b>6. Différence de potentiel électrique .....</b>	<b>30</b>
6.1 Energie potentielle électrique .....	30
6.2 Potentiel électrique en un point situé près d'une charge Q .....	30
6.3 Différence de potentiel entre 2 points .....	31
6.4 Charge placée entre 2 plaques // chargées de signes contraires .....	32
6.5 Mouvement d'une charge dans un champ électrique .....	33
<b>7. Quelques applications des champs électriques .....</b>	<b>34</b>
<b>8. Exercices d'électrostatique .....</b>	<b>36</b>
8.1 Exercices qu'il faut savoir faire .....	36
8.2 Exemples de questions d'évaluation des compétences .....	39
8.3 Olympiades de physique .....	41
<b>ELECTROCINETIQUE.....</b>	<b>44</b>
<b>1. Savoirs.....</b>	<b>44</b>
<b>2. Compétences .....</b>	<b>44</b>
<b>3. Notion de courant électrique .....</b>	<b>44</b>
3.1 Déplacement momentané des charges électriques .....	44
3.2 Analogie hydraulique.....	45
3.3 Déplacement permanent d'électrons.....	45
3.4 Le circuit électrique : générateur, conducteur, récepteur .....	46
<b>4. Rappels des lois fondamentales d'électricité.....</b>	<b>50</b>
4.1 Loi d'Ohm .....	50
4.2 Puissance P .....	52
4.3 Energie E .....	52

<b>5. Loi de Pouillet. Détermination des résistances.</b> .....	<b>53</b>
<b>6 L'effet Joule – loi de joule</b> .....	<b>54</b>
6.1 L'effet joule .....	54
6.2 Conclusion .....	55
6.3 Cause de l'effet joule .....	55
6.4 Applications de l'effet joule .....	55
<b>7 Associations de résistances en série</b> .....	<b>59</b>
7.1 Définition .....	59
<b>8 Association de résistances en parallèle</b> .....	<b>61</b>
8.1 Définition .....	61
<b>9 Associations de résistance en parallèle et en série.</b> .....	<b>63</b>
<b>10 Lois de Kirchhoff</b> .....	<b>65</b>
<b>11. Générateur</b> .....	<b>67</b>
11.1 Tension électromotrice et résistance interne .....	67
11.2 Expression de la tension U aux bornes du GN .....	68
11.3 Loi d'Ohm pour un GN relié à une résistance R .....	69
11.4 Groupements de GN .....	70
<b>12. Les récepteurs</b> .....	<b>71</b>
12.1 Définition .....	71
12.2 Caractéristiques des récepteurs .....	71
12.3 Expression de la tension aux bornes du récepteur .....	72
<b>13 Loi d'Ohm pour un circuit fermé complet</b> .....	<b>73</b>
<b>14 Installation domestique</b> .....	<b>75</b>
<b>15. Exercices</b> .....	<b>78</b>
15.1 Intensité, tension, loi d'Ohm, loi de Joule .....	78
15.2 Exercices sur les résistances en série et en // .....	79
15.3 Exercices sur les générateurs .....	83
15.4 Exercices sur les récepteurs .....	83
15.5 Exercices supplémentaires .....	84
15.6 Olympiades de physique .....	87
<b>ELECTROMAGNETISME</b> .....	<b>91</b>
<b>1. Savoirs</b> .....	<b>91</b>
<b>2. Compétences</b> .....	<b>91</b>
<b>3. Magnétisme</b> .....	<b>92</b>
3.1 Les aimants .....	92
3.2 Les phénomènes magnétiques .....	92
3.3 Champ magnétique B .....	94
<b>4. Electromagnétisme</b> .....	<b>98</b>
4.1 Magnétisme produit par le courant rectiligne .....	98
4.2 Magnétisme produit par un courant circulaire (spire) .....	99
4.3 Champ magnétique produit par un solénoïde .....	101
4.4 L'électro-aimant .....	103
4.5 Interprétation de l'aimantation : modèle d'Ampère .....	105

<b>5 La force électromagnétique ou force de Laplace</b> .....	<b>106</b>
5.1 Expérience .....	106
5.2 Conclusions .....	106
5.3 Expression de la force électromagnétique F .....	107
5.4 Applications.....	109
5.5 Interactions entre 2 fils parallèles. ....	114
<b>6. Induction électromagnétique</b> .....	<b>115</b>
6.1 Production d'un courant à partir d'un aimant .....	115
6.4 Tension électromotrice due au mouvement .....	123
6.5 Applications des courants induits .....	123
6.6 Auto-induction ou self induction .....	128
<b>7. Les courants alternatifs</b> .....	<b>131</b>
7.1 Production.....	131
7.2 Les effets du courant alternatif .....	135
<b>8. Les transformateurs</b> .....	<b>138</b>
8.1 Introduction .....	138
8.2 Description.....	138
8.3 Expérience .....	139
8.4 Applications.....	140
<b>9. Les circuits en courant alternatif</b> .....	<b>141</b>
9.1 Circuit contenant un résistor R .....	142
9.2 Circuit contenant une bobine ou un solénoïde d'inductance L .....	142
9.3 Tension alternative appliquée à un condensateur.....	145
9.4 Circuit RLC .....	150
<b>10 Exercices</b> .....	<b>151</b>
110.1 Magnétisme et électromagnétisme.....	151
10.2 Force électromagnétique ou force de Laplace .....	153
10.3 Induction électromagnétique.....	157
113B10.4 Olympiades de physique .....	160
<b>36B Annexes</b> .....	<b>163</b>
Géométrie .....	163
Mathématique .....	164
Constantes physiques.....	165
<b>Index</b> .....	<b>169</b>

# Electrostatique

Cette partie du cours de physique étudie le comportement des charges électriques au repos ainsi que l'influence de celles-ci les unes sur les autres

## 1. Savoirs

A la fin de ce chapitre, vous devrez avoir acquis les **savoirs** suivants

- Electrification par influence, conductibilité électrique.
- Aspect microscopique de la matière : valeur de la charge élémentaire, principe de conservation de la charge électrique.
- Cage de Faraday, paratonnerre.
- Loi de Coulomb.
- Champ électrique, spectres, analogie avec le champ de pesanteur.
- Différence de potentiel électrique.

## 2. Compétences

Vous devrez avoir acquis les **compétences** suivantes

- Interpréter les phénomènes électrostatiques par les transferts d'électrons.
- Montrer que le corps humain est conducteur d'électricité et que l'humidité accroît cette conductibilité.
- Identifier les dangers de l'électricité statique dans des situations quotidiennes.
- Expliquer et appliquer la loi de Coulomb.
- Représenter la force électrique s'exerçant sur une charge placée en un point où le champ électrique est connu.
- Relier les propriétés de conductibilité électrique des métaux au comportement des électrons dans la matière.
- Prévoir le mouvement d'une charge électrique dans un champ électrique.
- Expliquer la stabilité des atomes et des molécules par l'existence de forces électriques.

## 3. Electrifications

Nous avons tous entendu parler d'électricité statique. Mais quelle est son origine ? Quelles sont ses propriétés ? Comment peut-on rendre un corps « électrique » ?

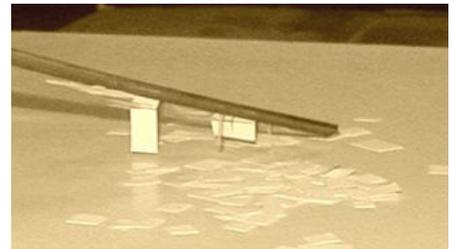


Figure 13.1

### 3.1 Electrification par frottement

#### 3.1.1 Observations

1. Un disque tournant sur un tourne-disque et soumis aux frottements de l'aiguille du pick-up attire la poussière à sa surface.
2. Retirons un disque de sa pochette, il attire les poussières.
3. Des papiers bien secs peuvent être attirés par une latte de plastique préalablement frottée avec un tissu. (Figure 13.1)
4. L'enfillement de certains vêtements fait apparaître de l'électricité dite statique qui se manifeste par le hérissément des poils et des cheveux. (Figure 13.2)
5. Des cheveux secs se dressent lors du passage d'un peigne.



Figure 13.2

6. Que peut-on observer en déplaçant son bras près de l'écran de la TV en fonctionnement ?
7. Après avoir roulé en voiture, si vous touchez la carrosserie de votre voiture, vous ressentez une certaine décharge électrique. Pourquoi ?
8. Décharge électrique entre 2 personnes mais aussi entre le sol et les nuages. (Figure 13.3)



Figure 13.3

### 3.1.2 Expériences

1. Approchons une tige d'ébonite (caoutchouc durci par addition de soufre) d'une bille de frigolite accrochée à une potence. Rien ne se passe.
2. Frottons la tige avec un drap ou une peau de chat (figure 13.4) et approchons-la de la bille. (Figure 13.5). Celle-ci est attirée par la tige.

S'il est frotté avec un tissu de laine, un morceau d'ambre ou de plastique peut attirer des morceaux de papier ou des grains de poussière. Nous en concluons qu'il y a une nouvelle force, la **force électrique**. Elle a forcément une cause dans une propriété de la matière, ou plus précisément une propriété de ses constituants. Nous l'appelons la **charge**

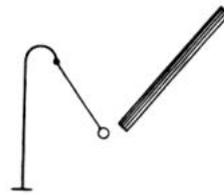


Figure 13.5



Figure 13.4

**électrique**, ou plus approprié la **charge électromagnétique** parce qu'elle est aussi à l'origine des phénomènes magnétiques. La charge est une propriété des particules massives, pour le monde ordinaire principalement des protons et électrons.

### Conclusions

*Les frottements communiquent à certains corps la faculté d'attirer des corps légers. Nous dirons que le corps frotté a été électrisé ou qu'il a subi une électrisation par frottement. On dit aussi que le corps a été chargé d'électricité ou qu'il s'est électriquement chargé. Un corps électrisé possède la propriété d'attirer un petit pendule.*

### Remarque

Les expériences d'électrisation par frottement dépendent souvent de l'état d'humidité de l'air. Pour être concluantes, il faut un air bien sec. Ce qui n'est pas évident chez nous et à cette période de l'année. Afin de réaliser les expériences, nous utiliserons dans la mesure du possible une machine dite « machine de Wimshurst<sup>1</sup> » dont le rôle sera de remplacer la tige et la peau de chat.

### Descriptif

Cette machine est constituée de 2 disques en ébonite recouverts de secteurs d'étain. (Figure 13.6)

Ces 2 disques peuvent tourner autour d'un axe. Lors de leur rotation, ils frottent sur des peignes métalliques. Sans entrer dans les détails, retenons que le frottement de ces disques va



Figure 13.6

<sup>1</sup> James Wimshurst (1832 à Londres - 1903), physicien britannique.

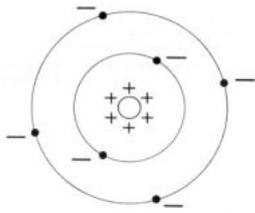
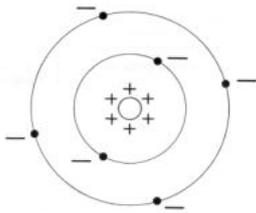
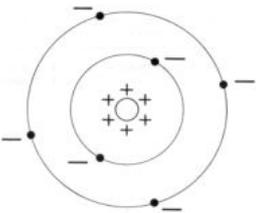
électriser les 2 boules reliées aux 2 peignes.

*L'électrisation produite par cette machine est de loin plus efficace que celle produite manuellement.*

### 3.1.3 Modèle atomique

Rappelons que les atomes de la matière sont constitués de noyaux (chargés positivement) et d'électrons (chargés négativement).

L'atome est électriquement **neutre** c'est à dire que la charge positive du noyau est égale à la charge négative des électrons.

		
<p>Un corps est électriquement neutre s'il porte autant de charges positives que négatives</p>	<p>Un corps est chargé positivement lorsqu'il possède un défaut d'électrons (il a perdu des électrons). <i>L'atome est appelé : ion positif</i></p>	<p>Un corps est chargé négativement s'il possède un excès d'électrons (il a gagné des électrons). <i>L'atome est appelé ion négatif</i></p>

### 3.1.4 Interprétation des expériences

Lors du frottement du bâton d'ébonite sur la peau de chat, des électrons de la peau sont arrachés à celle-ci et passent sur la tige. *L'ébonite se charge négativement.* (Figure 13.7)

*Electriser par frottement un corps ne revient donc par créer des charges supplémentaires mais bien à rompre l'équilibre électrique initial.*

*Un corps chargé d'électricité exerce des forces « électriques » sur les corps situés dans son voisinage.*

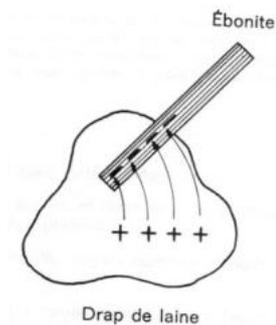


Figure 13.7

## 3.2. Electrification par contact

### 3.2.1 Expérience

1. Approchons près du pendule (balle de bureau), la tige d'ébonite frottée. Il y a attraction entre la tige et la balle. (Figure 13.8)
2. Après contact, il y a répulsion entre la tige et la balle.

### 3.2.2 Interprétation des expériences

Avant contact, le corps électrisé (ébonite) attire à lui, le pendule.

Lors du contact, une partie des charges négatives de l'ébonite est transférée sur le pendule qui s'électrise aussi négativement. *Le pendule s'électrise par contact.*

Après contact, les deux corps se repoussent l'un l'autre

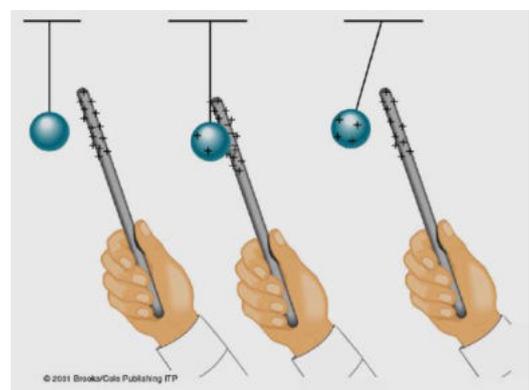
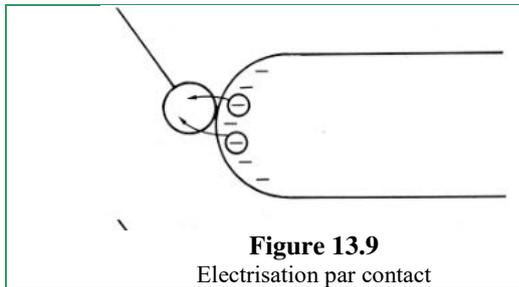


Figure 13.8

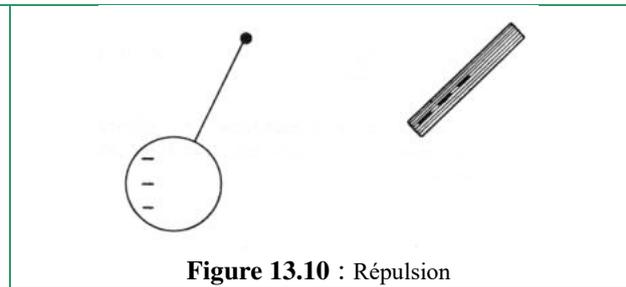
### Conclusion

Deux corps chargés d'électricité de même signe se repoussent.

### 3.2.2 Expérience



**Figure 13.9**  
Electrisation par contact



**Figure 13.10** : Répulsion

1. Approchons près du pendule (balle de bureau), la **boule A** de la machine de Wimshurst. Il y a attraction entre la boule et la balle. (Figure 13.9)
2. Après contact, il y a répulsion entre la boule et la balle. (Figure 13.10)
3. Approchons près de la balle, la **boule B** de la machine de Wimshurst. Il y a de nouveau attraction entre les 2 corps.

### Interprétation

Les effets des électrisations des 2 boules **A** et **B** de la machine de Wimshurst sont différents sur un même objet. Nous sommes obligés d'admettre que les charges électriques portées par la **boule A** sont différentes de celles portées par la **boule B**.

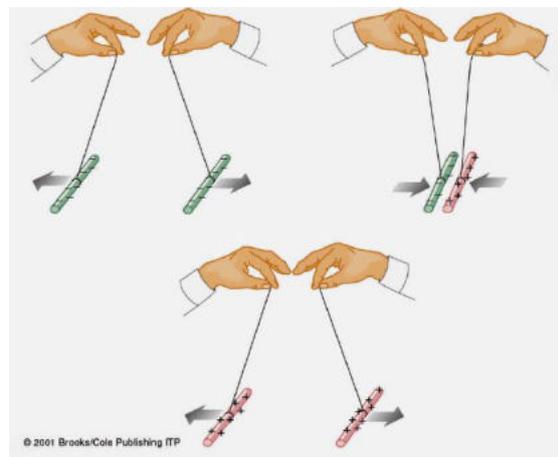
*Un même raisonnement peut être fait sur l'électricité portée par l'ébonite frottée et sur l'électricité portée par le verre frotté. Elles sont différentes.*

Par convention, on appelle :

**Electricité négative**, celle portée par l'ébonite frottée.

**Electricité positive**, celle portée par le verre frotté.

Toutes les expériences se ramènent à la même conclusion : Il n'existe que 2 sortes d'électricité : la positive et la négative



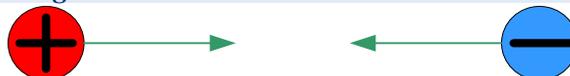
**Figure 13.11**

Les corps électrisés de même signe se repoussent et les corps électrisés de signes contraires s'attirent.

*Deux charges électriques de même signe se repoussent.*



*Deux charges électriques de signes contraires s'attirent.*



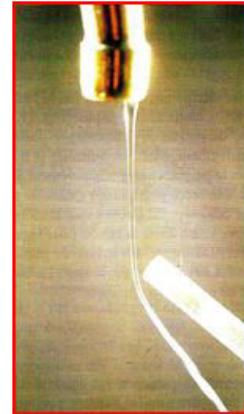
### 3.2.3 Remarques

A. Les charges électriques sont des grandeurs mesurables.

*L'unité de charge électrique est le coulomb C. La plus petite quantité d'électricité mesurée en valeur absolue est celle portée par l'électron et sa charge vaut  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C et est notée e.*

B. Un conducteur chargé dans l'air ne peut maintenir sa charge indéfiniment. En effet les ions (positifs et négatifs) que l'air contient toujours sont attirés par la charge de signe contraire du conducteur et finissent plus ou moins rapidement par le décharger.

C. Les charges de signe contraire s'attirent. Ainsi si les 2 boules de la machine de Wimshurst sont chargées + et - par frottement et si leur quantité est suffisante, alors on observe une décharge électrique entre les 2 boules. Cette décharge est le signe que les charges + et - circulent dans l'air pour se neutraliser. C'est ce qui se passe lors d'un orage lors de la formation d'un éclair. (*voir électrisation par influence*)



Les molécules d'eau sont polarisées. Si une tige chargée est amenée près d'un filet d'eau, les molécules s'alignent de façon qu'elles soient attirées vers la tige chargée. Pensez-vous qu'un liquide non polaire, comme l'essence, a un comportement pareil ?

Figure 13.12

## 3.3 Conducteur et isolant

### 3.3.1 Expérience

Electrisons avec la machine de Wimshurst un bâton d'ébonite et une tige en cuivre et approchons-les du pendule.

L'ébonite n'attire le pendule que par sa partie électrisée.

Le cuivre, sur toute sa longueur attire le pendule.

### 3.3.2 Les conducteurs

Les métaux sont constitués d'un ensemble de petits cristaux dans lesquels les atomes sont ordonnés en réseau.

*Ces atomes métalliques ont un ou plusieurs électrons périphériques qui demeurent à l'intérieur du réseau et y circulent dans tous les sens, on les appelle les électrons libres* (Figure 13.13)

*Les corps qui permettent le passage des électrons libres sont appelés conducteurs (cuivre, or, argent, aluminium, mercure le carbone, le corps humain...)*

Les électrons apportés par électrisation sont automatiquement répartis sur toute la surface du conducteur. (Figure 13.14)

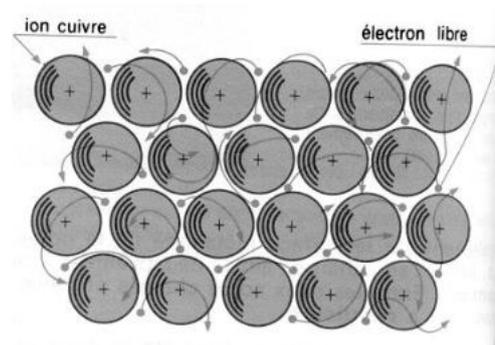


Figure 13.13 : Les métaux sont caractérisés par des électrons libres qui peuvent circuler dans tous les sens

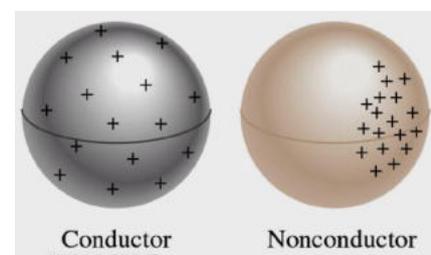


Figure 13.14 : Dans un conducteur, les électrons sont automatiquement répartis sur toute la surface. Dans un isolant, les charges restent

### 3.3.3 Les isolants

*Les corps qui par leur structure interne, ne permettent pas le passage des électrons libres d'un atome à un autre sont appelés des isolants électriques (ébonite, verre, porcelaine, les matières plastiques ...)*

Electriser un isolant est plus facile qu'électriser un conducteur. En effet, *les charges produites par électrisation sur un isolant, restent localisées à l'endroit du frottement* ou du contact.

Par contre sur un conducteur, les charges produites se dispersent sur l'ensemble de celui-ci.

Le degré de conduction ou d'isolation n'est pas une constante et peut varier suivant les circonstances. En effet, l'air est à la fois un isolant et un conducteur de charges électriques lors d'un orage (éclair) pendant un bref instant.

En effet, la foudre est un écoulement de charges électriques négatives provenant du nuage et le sol (la terre).

### 3.3.4 Mise à la terre

On entend souvent parler « *de mise à la terre d'un conducteur* ». Mais que signifie cette expression ?

#### Expérience

Si on relie la boule A de la machine électrostatique au robinet d'eau par l'intermédiaire d'un fil de cuivre, on s'aperçoit que la boule n'a plus d'influence électrique.

*L'opération qui consiste à permettre aux charges électriques, réparties à la surface d'un corps, de s'écouler vers le sol s'appelle mise à la terre. On dit que le corps se décharge via la terre.*

Les charges s'écoulent vers la Terre qui est donc un immense réservoir de charges électriques.

(Figure 13.15)

Un corps chargé – et mis à la terre voit ses charges – en excès partir vers le sol.

Un corps chargé + et mis à la terre reçoit des électrons du sol qui s'uniront au + pour rendre le conducteur neutre.

Le corps humain étant un bon conducteur d'électricité,

il peut servir pour la mise à la terre. Ceci est dangereux

pour l'être humain car les charges iront dans la terre en passant par le corps ce qui peut entraîner des lésions internes.

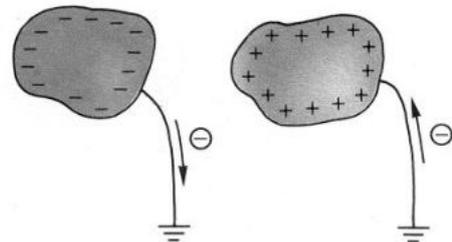


Figure 13.15

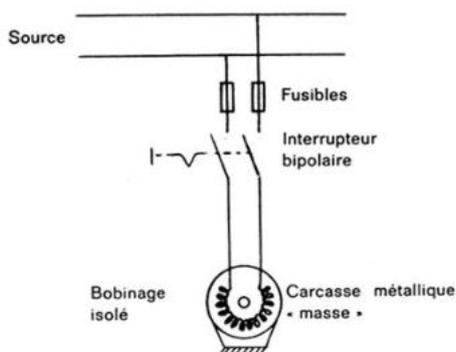


Figure 13.16

#### Lecture

#### Mise à la terre des appareils ménagers

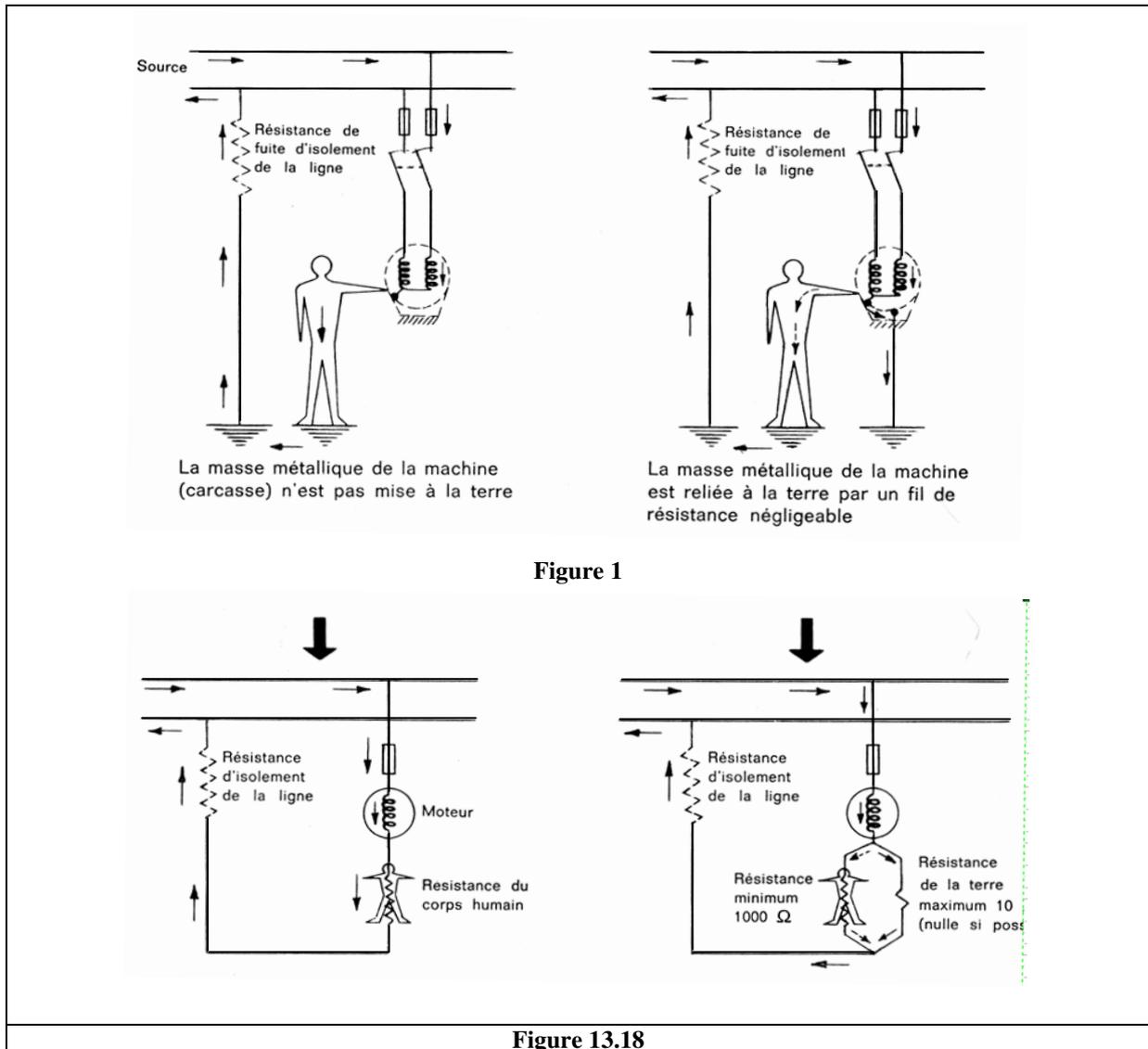
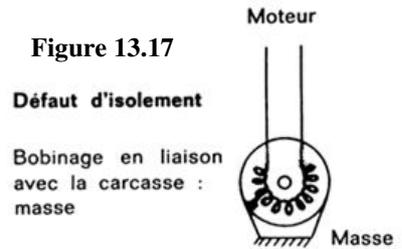
L'homme est conducteur de courant électrique. Son degré de conduction dépend de nombreux facteurs : état physiologique, transpiration des mains, des pieds, nature des chaussures, résistances de contact,....

Si un individu touche une carcasse métallique mal isolé électriquement, le courant qui s'y trouve s'évacuera dans le sol via le corps de l'être humain. Ceci peut être extrêmement dangereux

pour l'individu. Pour éviter cela, on a deux solutions ;

1. Mettre la carcasse en matière isolante de telle sorte qu'aucun contact ne soit possible avec une pièce en contact avec du « courant ».

- Mettre la carcasse métallique en connexion avec la terre. On dit que l'on relie la masse de l'appareil à la terre. De ce fait, le courant de « fuite » s'évacuera préférentiellement dans la terre via le fil de terre et non par le corps de l'individu.



**Remarque**

Les camions citernes, les avions et les voitures peuvent se charger d'électricité par frottement avec l'air. Les pneumatiques étant isolants, les charges s'accumulent sur le véhicule. Les voitures peuvent être reliées à la terre via une tresse métallique pour éviter des malaises aux personnes sensibles à l'électricité statique. Les camions citernes sont reliés à la terre lors d'un remplissage du carburant pour éviter toute étincelle dangereuse.

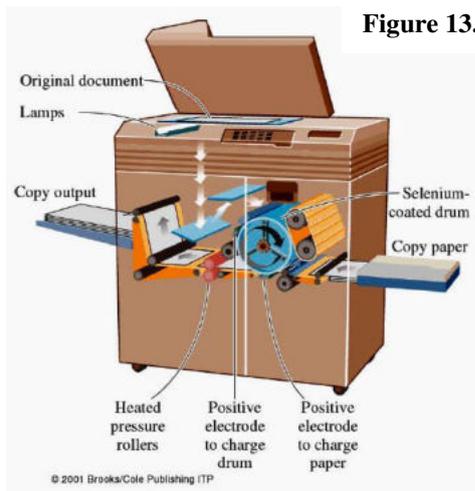


Figure 13.19

### Photocopieuse et imprimante laser

Le tambour est la pièce centrale du photocopieur et de l'imprimante laser. Il est couvert d'une couche de sélénium photoconducteur, qui est isolant à l'obscurité mais devient conducteur à la lumière. Sa surface entière est d'abord chargée positivement puis l'image est projetée dessus. La charge sur les portions illuminées diminue fortement. Les régions noires restent chargées positivement et attirent la poudre du toner chargée négativement. Une feuille de papier très fortement chargée positivement attire alors le toner et passe entre deux cylindres chauffés pour le fixer.

## 3.4 Electrification par influence

### 3.4.1 L'électroscope

L'électroscope est constitué d'un plateau conducteur prolongé par une tige comportant 2 parties mobiles également conductrices.

(Figure 13.20)

Schématiquement, il est représenté à la Figure 13.21 :

Par simple contact avec un corps chargé, l'électroscope va se charger et l'écartement des tiges mobiles permet une mesure de la charge.

(Figure 13.22)

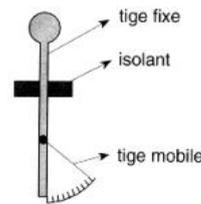


Figure 13.21



Figure 13.20

### 3.4.2 Expériences

1. Approchons sans toucher le plateau, un corps électrisé.

Les 2 tiges de l'électroscope s'écartent.

(Figure 13.23a)

2. Retirons le corps électrisé. Les 2 tiges se rapprochent.

(Figure 13.23b)

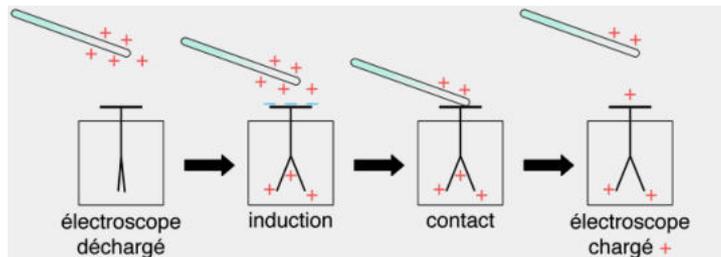


Figure 13.22 : Chargement d'un électroscope par contact.



Figures 13.23 a et b

### 3.4.3 Interprétation

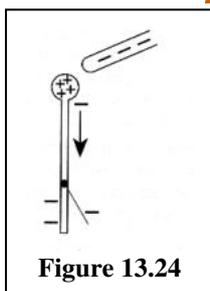


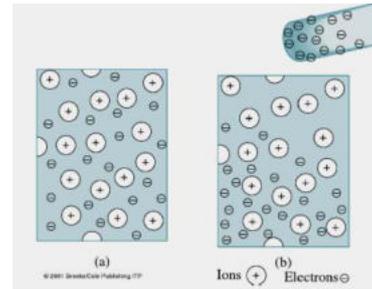
Figure 13.24

En fait les électrons libres du plateau sont repoussés vers le bas de l'électroscope par l'influence des charges négatives portées par le corps électrisé. (Figure 13.24) Les charges de même signe se repoussant, les 2 tiges s'écartent et un excès de charges positives s'accumule sur le plateau supérieur. On dit que l'électroscope subi l'influence électrique du corps électrisé.

*L'effet global est donc une séparation des charges positives et négatives pour l'électroscope*



**Figure 13.25 :** Electrification par influence. La tige négative repousse les électrons vers les feuilles de l'électroscope. Les deux feuilles portant le même signe se repoussent et s'écartent.



**Figure 13.26 :** (a) Le conducteur est neutre et les électrons sont répartis de façon uniforme. (b) Une tige chargée négativement repousse des électrons vers le bas. La partie inférieure devient chargée négativement par l'afflux d'électrons tandis que la partie inférieure devient positivement chargée par manque d'électrons. La position des ions positifs moins mobiles n'est pratiquement pas affectée par l'attraction de la tige

### 3.4.4 Expériences

1. Relions à la terre l'électroscope (toujours soumis à l'influence d'un corps électrisé négativement) par l'intermédiaire d'un corps humain. Les 2 tiges se rapprochent. (Figure 13.27)

Les charges négatives qui sont repoussées quittent l'appareil via la terre.

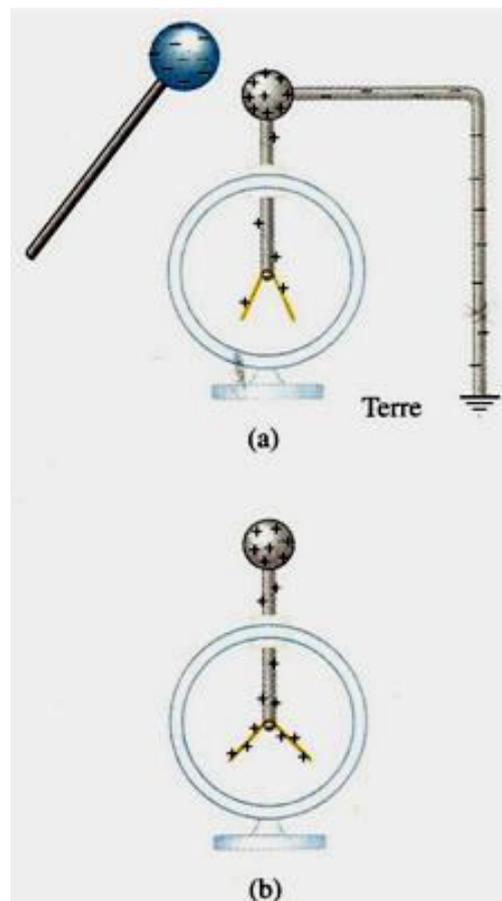
L'électroscope se décharge des -, il ne reste que des +.

L'électroscope est chargé positivement

En effet les électrons de l'électroscope tendent à se repousser et à s'éloigner du corps électrisé. Ceux-ci quittent l'électroscope dès que celui-ci est relié à la terre. Les feuilles se rapprochent.

2. Retirons la mise à la terre et éloignons le corps électrisé négativement de l'électroscope. Les 2 tiges s'écartent de nouveau car les charges positives restantes se répartissent sur tout l'électroscope.

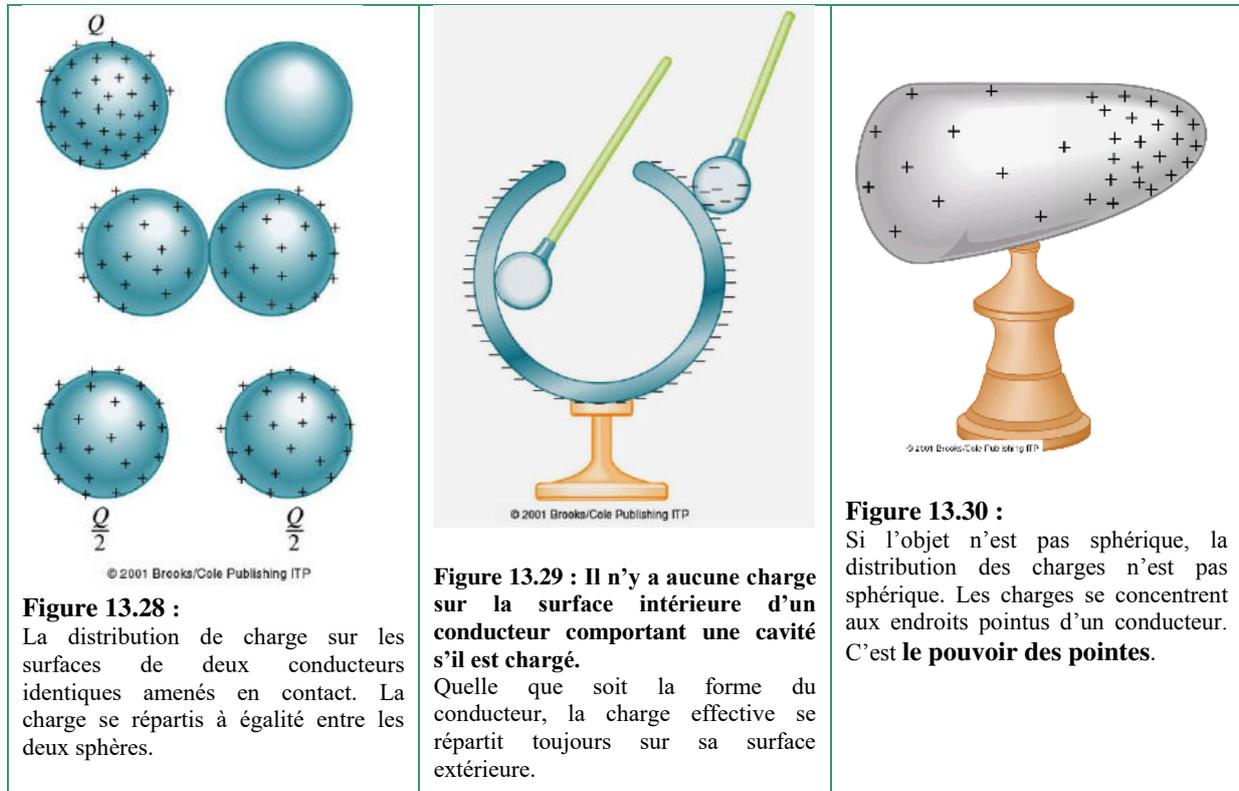
*Celui-ci se retrouve chargé de charges de signe contraire à celle portée par le corps qui l'a influencé.*



**Figure 13.27 :** En laissant les électrons s'échapper vers la terre, puis en isolant l'électroscope de la terre, il devient chargé positivement d'une façon permanente.

## 3.5 Autres expériences d'électrostatique

### 3.5.1 Distribution des charges sur un conducteur.



### Exemples d'applications du pouvoir des pointes.



#### *Le tourniquet électrostatique*

Si on électrise un tourniquet muni de pointes avec la machine de Whimshurst, il se met à tourner en sens inverse des pointes. Chaque pointe émet des charges dans l'air et par réaction il se met à tourner.

***Si un conducteur doit capter ou évacuer des charges, il le fait préférentiellement via ses pointes.*** (Figure 13.31)

Les électrons exercent une telle force de répulsion entre eux que certains quittent le tourniquet.

**Figure 13.31**

#### *Le paratonnerre*

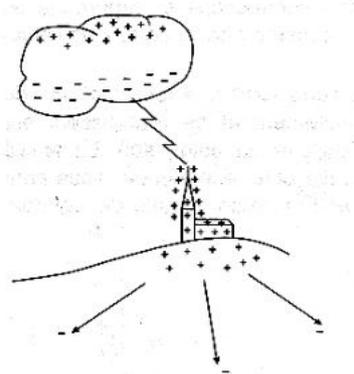
Dans un nuage orageux du type cumulonimbus (masse de plusieurs milliers de tonnes), les courants d'air humide transportent vers le haut des charges positives et vers le bas des charges négatives.

Les objets du sol subissent cette influence électrique et deviennent positifs d'autant plus qu'ils sont pointus. Une décharge électrique peut alors se produire (coup de foudre) entre le nuage et les corps au

sol. (Figure 13.32) [C'est le même effet que la décharge se produisant entre les 2 boules de la machine de Whimshurst]

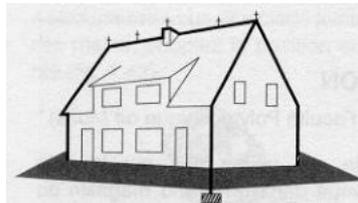
On peut protéger ces corps en attirant cette foudre via une pointe qui est le paratonnerre. Mais celui-ci doit pouvoir évacuer toutes ces charges dans la terre. Un bon paratonnerre est un bon conducteur qui sera relié au sol. (Figures 13.33 et 13.34)

Un tel dispositif fut inventé par Benjamin Franklin.

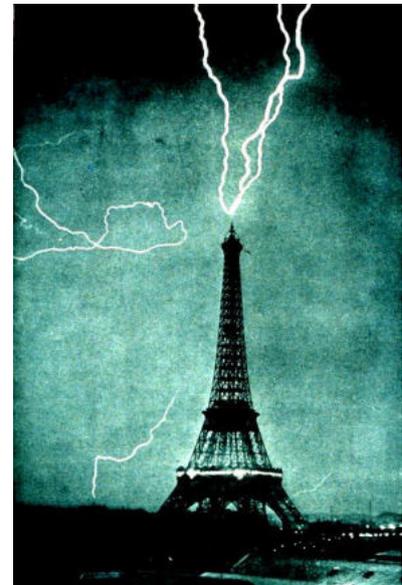


**Figure 13.32 :** Un objet haut placé (clocher d'une église) attire la foudre

**Figure 13.34 :** La Tour Eiffel dans un orage



**Figure 13.33 :** Une maison équipée de paratonnerres reliés à la terre protège la maison contre la foudre.



Benjamin Franklin	
	
<small>Par Joseph Siffred Duplessis vers 1785</small>	
<b>Naissance</b>	17 janvier 1706 Boston (Colonie de la baie du Massachusetts)
<b>Décès</b>	17 avril 1790 Philadelphie (États-Unis)
<b>Fonction(s)</b>	Imprimeur et physicien

**Lecture :**  
**Règles élémentaires de protection contre la foudre.**

## LA Foudre RÈGLES ÉLÉMENTAIRES DE PROTECTION

par C. Bouquegneau (Professeur ordinaire à la Faculté Polytechnique de Mons)\*

### INTRODUCTION

La foudre, phénomène naturel fantastique, a toujours impressionné l'homme par ses aspects mystérieux et redoutables. Si, sur la planète entière, la foudre frappe quelque cent fois par seconde, nous ne connaissons en Belgique qu'une quinzaine de jours d'orage par an, surtout l'été, hélas!, avec des conséquences fatales (environ un mort par million d'habitants et par an).

Voici quelques règles élémentaires permettant une meilleure protection des personnes contre la foudre.

### COMMENT S'EN PROTÉGER ?

Chez soi, il n'y a en général rien à craindre. Il suffit de se concentrer au milieu de la pièce de séjour, de rester assis autour de la table familiale (fig. 1.39) à l'écart des cheminées, des portes et des fenêtres.



Figure 1.39  
Autour de la table familiale

Écartez-vous des réverbères, des clôtures ou autres structures métalliques, des arbres isolés, de tout point culminant (fig. 1.40).



Figure 1.40  
Attention aux arbres  
et aux clôtures métalliques

À l'extérieur, en ville, ne restez pas sur la voie publique : précipitez-vous dans un grand magasin ou un bâtiment public où vous serez à l'abri. Si cela n'est pas possible, à la campagne par exemple, ne restez jamais groupés (fig. 1.41);



Figure 1.41  
Ne restez pas groupés

S'assurer qu'il n'y a pas de courant d'air! Ne pas prendre de bain; ne pas toucher de conducteur métallique, qu'il s'agisse de canalisations d'eau, de gaz ou d'électricité (fig. 1.42). Débrancher les antennes de radio et de télévision, déconnecter le câble de télédistribution, même si l'arrivée est souterraine. Ne pas téléphoner!



Figure 1.42  
Précautions à prendre chez soi

Accroupissez-vous, les pieds joints, sans toucher le sol des mains; adoptez la position en boule dite de sécurité (fig. 1.43).



Figure 1.43  
Accroupissez-vous!

Si vous devez absolument vous déplacer en cas d'orage, faites-le à petits pas ou en courant (un seul pied en contact avec le sol) en évitant de déployer parapluie ou autre objet saillant. Les grands quadrupèdes sont plus vulnérables que nous : soyons prudent, car nous, nous savons... (fig. 1.44)

Ne vous abritez jamais sous une toiture métallique à moins que vous ne soyez certain que celle-ci soit soigneusement reliée électriquement à la terre (fig. 1.45).

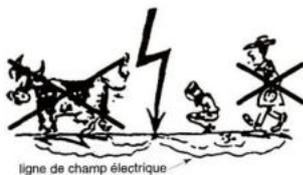


Figure 1.44



Figure 1.45  
Mises à terre!

En voiture, à carrosserie métallique, vous êtes à l'abri; rentrez toutefois l'antenne de radio. Roulez, ou si vous préférez vous arrêter craignant l'éblouissement de l'éclair et le bruit du tonnerre, ne stationnez pas sous un arbre ou près de structures métalliques; ne quittez surtout pas votre véhicule qui vous protège en vous offrant une cage de Faraday (fig. 1.46). En avion et en fusée, il n'y a en général rien à craindre.



Figure 1.46  
Restez dans votre voiture

En vacances ou au cours de vos loisirs, si l'orage menace, évitez de séjourner sur une barque, un voilier ou un yacht à moins que ceux-ci ne soient judicieusement protégés par des structures métalliques extérieures servant de paratonnerres et plongeant dans l'eau en leur partie inférieure, ce qui assure un excellent contact électrique de mise à la terre (fig. 1.47).

Ne nagez pas, abandonnez votre planche à voile. Suspendez vos activités sportives de plein air : terrains de sport surtout à la lisière d'un bois ou près de structures métalliques de grande hauteur; pas de cyclisme, de motocyclisme ni d'équitation...

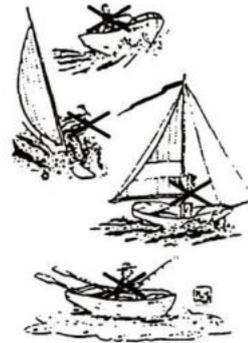


Figure 1.47  
Méfiez-vous des sports nautiques

Sous la tente (fig. 1.48) ou à l'intérieur d'une caravane, assurez-vous qu'un bon conducteur métallique (paratonnerre) soit correctement relié à la terre après avoir entouré tout le volume à protéger.

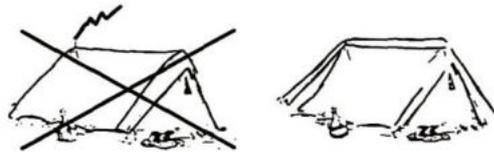


Figure 1.48  
Sous la tente

Si vous prenez toutes ces précautions, la foudre ne devrait vous paraître qu'un spectacle distrayant et ses effets – qui vont du foudroiement immédiat à la simple volatilisation des vêtements en passant par des éblouissements, des chocs nerveux, des paralysies, des cécités et des comas momentanés – devraient certainement vous épargner. Si quelqu'un de votre entourage se retrouve inanimé, n'oubliez pas de pratiquer sur lui la respiration artificielle ou un massage cardiaque qui ont sauvé déjà bien des vies.

La foudre frappe, terrorise, entraîne parfois des catastrophes, mais elle est aussi un bien par certains de ses aspects : depuis les origines de la vie, elle agite notre planète et d'autres mondes en perpétuelle création.

### 3.5.2 La cage de Faraday



**Michael Faraday**  
(Newington, 22 septembre 1791 - Hampton Court, 25 août 1867) est un physicien et un chimiste anglais, à ce titre fondateur de l'électrochimie.

*Une cage de Faraday est tout simplement une cage formée d'un grillage en matériau conducteur et isolée du sol. Elle constitue un écran contre les influences électriques.*

Si on place des corps dans une cage de Faraday, ceux-ci ne réagissent pas à l'influence électrique produit par un corps chargé placé à l'extérieur de cette cage. (Figure 13.35)

*(Voir expériences en classe)*

*L'influence électrostatique ne se manifeste donc pas à l'intérieur d'une cage de Faraday.*

*L'effet « Faraday » ne se produit pas si la cage est constituée d'un matériau isolant.*



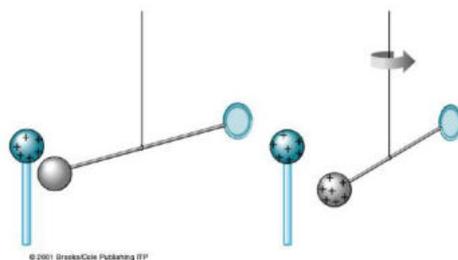
la cage de Faraday (photo H CHAMOUX DRP)

**Figure 13.35 :**  
Cage de Faraday

## 4. Loi de Coulomb

Nous savons que les charges de même signe se repoussent et que celles de signe contraire s'attirent. *Il existe donc entre les charges électriques des forces d'attraction ou de répulsion suivant les cas.* Quelles sont les caractéristiques des forces électriques ?

C'est le physicien français Coulomb qui établit en 1785 la loi de la force électrique.



**Figure 14.01 :** Détail du dispositif de Coulomb. Lorsque les deux sphères sont chargées, elles se repoussent. Le fil d'argent est alors tordu jusqu'à ce que son moment de force de rappel équilibre la force de répulsion électrostatique.



**Charles Augustin Coulomb** (14 juin 1736H, Angoulême - † 23 août 1806, Paris) est un officier, ingénieur et physicien français.

Prenons 2 charges électriques symbolisées  $q_1$  et  $q_2$  (exprimées en coulomb) supposées ponctuelles. Soit  $d$ , la distance qui les sépare.

*Les expériences révèlent que 2 corps chargés électriquement exercent l'un sur l'autre une force de type électrique  $F_{el}$  dont :*

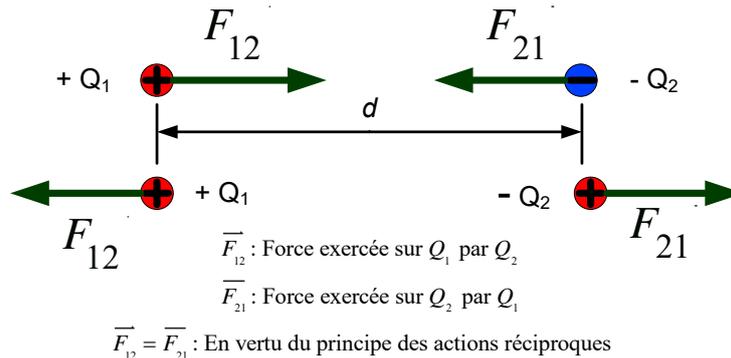
- *La direction est celle de la droite joignant les 2 corps chargés*
- *Le sens est déterminé par le signe des charges (voir schémas)*
- *L'intensité est :*
  - *inversement proportionnelle au carré de la distance  $d$*
  - *proportionnelle à  $q_1$  et  $q_2$*

$$F_{\text{él}} = k \frac{q_1 q_2}{d^2}$$

$F_{\text{él}}$	Force électrique en N
$k$	Constante de Coulomb
$q_1, q_2$	Charges électriques en C
$d$	Distance en m

$k$  est une constante électrique qui dépend des unités et du milieu dans lequel sont placées les charges. Si  $F$  est en Newton,  $q$  en Coulomb,  $d$  en mètre alors dans le vide et dans l'air.

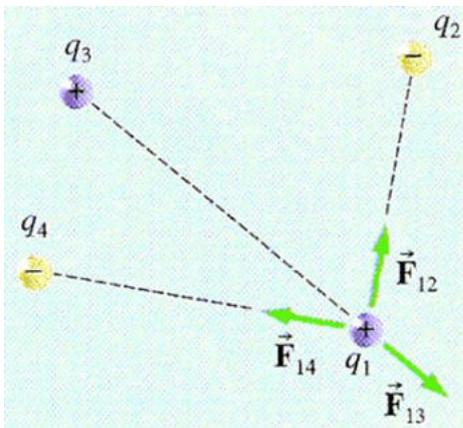
$$k = 9.10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2$$



## Le coulomb est une unité énorme

Imaginez deux petites sphères, portant chacune une charge de 1 coulomb et distantes d'un mètre dans le vide. Elles subissent une force d'environ :

$$F = k \frac{q_1 q_2}{d^2} = 9 \times 10^9 \frac{1 \times 1}{1^2} = 9.10^9 \text{ N}$$



**Figure 14.02 :** La force entre deux charges ne dépend pas des autres charges en présence. La force résultante que  $q_1$  est la somme vectorielle des forces exercées par les autres charges calculées l'une après l'autre.

C'est une force énorme, qui correspond au poids de plus de 2400 Boeings 747. Ceci veut dire que l'unité du coulomb représente une quantité de charge énorme.

La charge de l'électron est  $-1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{C}$ , un coulomb correspond à plus de six milliards de milliards d'électrons.

### La force électrique est une quantité vectorielle

Comme pour toutes les autres forces, la force électrique est une quantité vectorielle.

Il a été confirmé expérimentalement que, lorsque plusieurs charges sont présentes, chacune produit une force donnée par la loi de Coulomb.

**L'interaction entre deux charges est indépendante de la présence d'autres charges.** Ainsi, la force totale agissant sur l'une des charges est la résultante vectorielle de toutes les forces exercées sur elle par chacune des autres charges prises séparément. C'est **le principe de superposition**. (Fig 14.02)

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14} + \dots + \vec{F}_{1N}$$

Avec  $\vec{F}_{1i}$  : force exercée sur la charge 1 par la charge  $i$

**Exemple**

Trois petites sphères sont uniformément chargées. Déterminer la force résultante sur la sphère du milieu produite par les deux autres. (Figure 14.03)

**Solution**

En vertu du principe de superposition, la force sur  $q_2$  est la résultante des forces qui agissent de  $q_1$  et  $q_2$ .

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{23}$$

$$F_{21} = \frac{9 \times (+5) \times (-4)}{2^2} \times 10^{+9-3-3+4} = -450 \times 10^6 \text{ N} = -450 \text{ MN}$$

$$F_{23} = \frac{9 \times (-4) \times (+10)}{6^2} \times 10^{+9-3-3+4} = -100 \times 10^6 \text{ N} = -100 \text{ MN}$$

Les signes – indiquent que les forces sont attractives. En définissant la direction à droite comme positive, et tenant compte de la direction des deux forces, on obtient pour le module de la somme vectorielle :

$$F_2 = -|F_{21}| + |F_{23}| = -450 + 100 = -350 \text{ MN}$$

La force résultante agit vers la gauche.

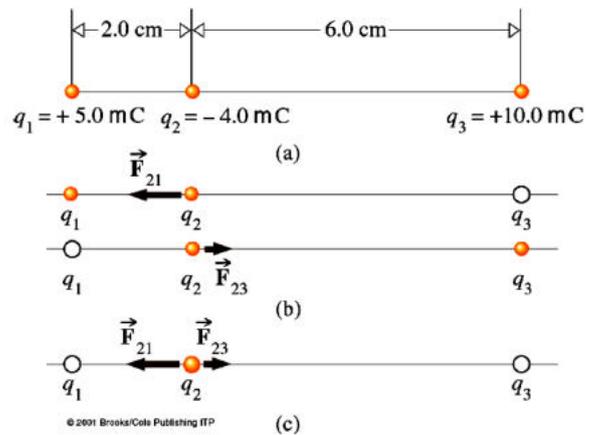


Figure 14.03

**Exemple**

Trois petites sphères chargées sont fixées aux sommets d'un triangle. Calculer la force exercée sur  $q_3$  par les autres charges. (Figure 14.04)

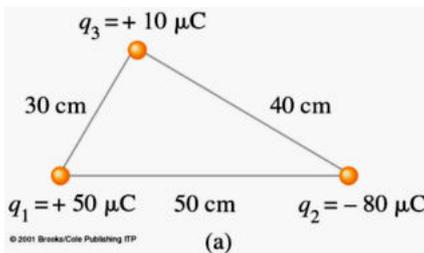


Figure 14.04

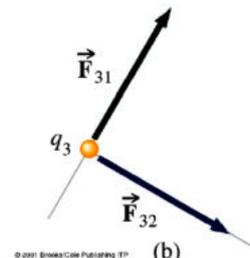


Figure 14.05

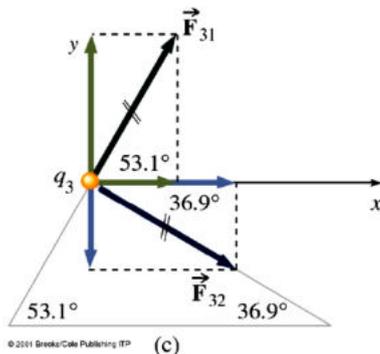


Figure 14.06

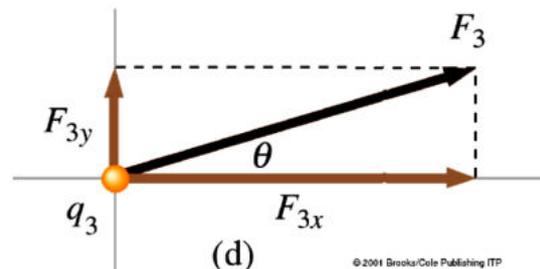


Figure 14.07

**Solution**

Nous déterminons si les forces sont attractives ou répulsives et traçons un diagramme de forces agissant sur  $q_3$ . (Figure 14.05)

La force entre  $q_1$  et  $q_3$  est répulsive, celle entre  $q_2$  et  $q_3$  est attractive :

$$F_{31} = \frac{9 \times 10 \times 50}{0.3^2} \times 10^{+9-6-6} = 50 \text{ N} \quad F_{32} = \frac{9 \times 10 \times (-80)}{0.4^2} = -45 \text{ N}$$

Leur direction est indiquée par la direction des flèches.

Nous notons que le triangle donné est rectangle puisque  $50^2 = 40^2 + 30^2$ . (Figure 14.06). Ce qui permet de déterminer facilement les angles donnés à la figure 38 en appliquant les relations trigonométriques classiques. Nous décomposons les forces  $F_{31}$  et  $F_{32}$  selon les axes  $x$  et  $y$

$$F_{3x} = |F_{31}| \times \cos 53.1^\circ + |F_{32}| \times \cos 36.9^\circ = 50 \times \cos 53.1^\circ + 45 \times \cos 36.9^\circ = +66 \text{ N}$$

$$F_{3y} = -|F_{31}| \times \sin 53.1^\circ + |F_{32}| \times \sin 36.9^\circ = -50 \times \sin 53.1^\circ + 45 \times \sin 36.9^\circ = +13 \text{ N}$$

Le module de  $F_3$  est alors :  $|F_3| = \sqrt{|F_{3x}|^2 + |F_{3y}|^2} = \sqrt{66^2 + 13^2} = 67 \text{ N}$  (Figure 14.07)

## 4.1 Comparaison des forces électrique et gravitationnelle

Dans un atome d'hydrogène, l'électron et le proton sont distants de  $0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$ . Comparez les forces électrique et gravitationnelle agissant entre eux.

$$\text{Masse du proton : } 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad \text{Charge du proton : } -e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\text{Masse de l'électron : } 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} \quad \text{Charge de l'électron : } e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\text{Module de la force électrique : } F_{el} = \frac{ke^2}{d^2}$$

$$\text{Module de la force gravitationnelle : } F_G = \frac{G.m_p.m_e}{d^2}$$

Rapport des forces :

$$\frac{F_{el}}{F_G} = \frac{ke^2}{G.m_p.m_e} = \frac{9 \times 1.6^2}{6.67 \times 1.67 \times 9.11} \times 10^{+9-19-19+11+27+31} = 0.22 \times 10^{40}$$

La force électrique qui s'exerce entre eux est  $2.10^{39}$  fois plus grande que la force gravitationnelle qui s'exerce entre ces deux particules. Ce qui est considérable. De plus ce rapport est indépendant de la distance. Ceci explique que *dans l'étude des atomes et des molécules, on néglige totalement les interactions gravitationnelles pour ne tenir compte que des interactions électriques.*

### Challenge

Les forces gravitationnelles sont si faibles qu'elles ne gouvernent pas à l'échelon de l'atome. Pourtant au niveau macroscopique et de l'univers, ce sont bien elles qui gouvernent. Pourquoi ?

## 4.2 Etude de stabilité de la molécule H<sub>2</sub>

Que se passe-t-il lorsque l'on approche deux atomes d'hydrogène H l'un près de l'autre ?

A une certaine distance des électrons et des noyaux entre eux, les forces *d'attraction et de répulsion* s'équilibrent.

L'association de deux atomes H acquiert ainsi un état stable : c'est la molécule H<sub>2</sub>. Entre les deux hydrogènes s'est formée une liaison.

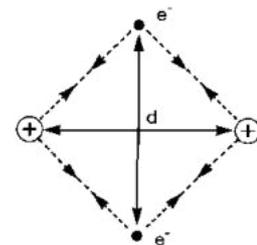


Figure 14.08 : la molécule d'hydrogène

## 4.3 Stabilité d'un noyau d'atome

Un noyau d'atome est constitué de protons et de neutrons. Le proton est une particule qui porte une charge électrique positive.

En principe le noyau devrait éclater suite à la répulsion électrique des protons entre eux. Or un noyau est un ensemble relativement stable. Il faut donc supposer l'existence d'une force d'attraction très intense entre ces particules. **Cette force, appelée force nucléaire forte, assure la cohésion du noyau.**

**Cette force est de loin plus intense que la force de répulsion entre les protons du noyau et elle exerce entre toutes les particules du noyau** (protons et neutrons)

Notons également que cette force est de courte portée c'est à dire qu'elle s'exerce à très courte distance.

## 5. Notion de champ électrique

### 5.1 Le champ de pesanteur ou de gravitation : $g$

Nous savons que la Terre exerce une force attractive sur tout objet placé en son voisinage. Cette force est connue sous le nom de force poids  $\vec{G}$ . **Autrement dit la Terre exerce autour d'elle, une certaine influence. On dit qu'il existe autour de la Terre un champ de pesanteur ou de gravitation.** (Figure 14.09)

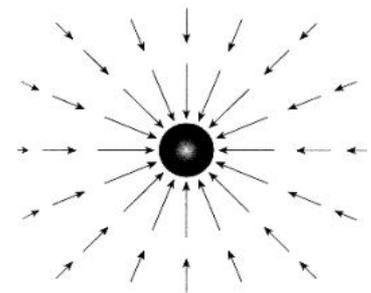


Figure 14.09

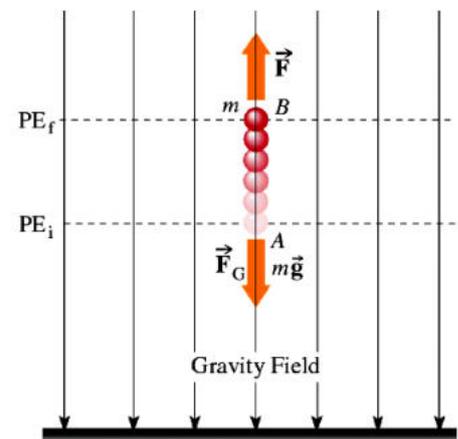
Pour étudier ce champ, on y place une masse témoin  $m$  en un point quelconque. On représente la force attractive  $\vec{G}$  exercée par la Terre sur cette masse  $m$ . En chacun des points, cette force est proportionnelle à la masse  $m$  du corps témoin.

Par conséquent, le rapport  $\vec{G} / m$  ne dépend pas de la masse du corps témoin.

**Le vecteur  $\vec{G} / m$  défini en tout point, représente le vecteur  $\vec{g}$  qui est appelé champ de pesanteur ou champ gravifique.**

**Le champ de pesanteur est l'ensemble des vecteurs  $\vec{g}$ .**

**Ce vecteur peut varier d'un point à un autre. La Terre est la source qui crée le champ et le champ dépend des propriétés de la source.** Il n'est pas nécessaire d'avoir un corps témoin en un endroit pour que le champ existe.



© 2001 Brooks/Cole Publishing ITP (a)

**Figure 14.10 :** Pour passer de la position initiale  $PE_i$  à la position finale  $PE_f$ , la force poids  $F_G$  effectue un travail résistant qui se transforme en énergie

Rappelons que dans un domaine limité, les vecteurs  $\vec{g}$  seront tous // et égaux. On dit que le champ est uniforme. On sait aussi au voisinage immédiat de la Terre  $g = 9,81 \text{ N / kg}$ .

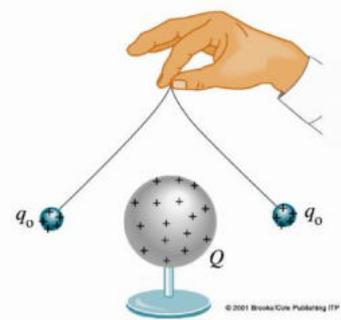
Pour soulever une masse dans le champ gravitationnel de la Terre, on doit exercer une force et effectuer un travail pour vaincre le champ de force descendant. Ce travail se transforme en énergie potentielle de la masse dans le champ, qui augmente ainsi de sa valeur initiale à une valeur plus élevée. Cette énergie potentielle peut être regagnée ensuite en ramenant la masse à son hauteur initiale. On dit que **la force gravitationnelle est conservative**

## 5.2 Champ électrique : E

### 5.2.1 Définition

La notion de champ gravifique peut être transposée aux phénomènes électriques.

Considérons une petite sphère portant une charge positive et uniforme. Nous voulons étudier son influence. Comme sonde nous utilisons une minuscule charge positive à l'extrémité d'un fil isolant. (Figure 14.11). En tout point de la région entourant la sphère (charge source), le détecteur de charge  $q_0$  subit une force dont le module et la direction sont des fonctions de ce point ; nous attribuons alors en chaque point un vecteur force correspondant. (Figure 14.12)



**Figure 14.11** : Une charge source  $Q$  agit sur une charge d'essai  $q$  en la repoussant radialement.

Si on place au voisinage de la charge  $Q$ , une *charge témoin*  $+q$ , la force électrique  $\vec{F}_{el}$  agissant sur  $q$  est proportionnelle à  $q$ .

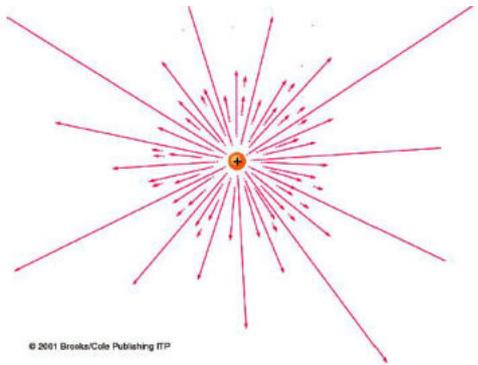
Par conséquent le vecteur  $\vec{F}_{el} / Q$  ne dépend pas de  $q$ .

On définit **le vecteur champ électrique**

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{el}}{q} \quad \text{avec } |\vec{E}| \text{ en N/C}$$

L'espace est donc connu électriquement si on connaît l'ensemble des vecteurs  $\vec{E}$ .

**Le champ électrique  $\vec{E}$  est un vecteur défini à partir d'un autre vecteur  $\frac{\vec{F}}{q}$ .**



**Figure 14.12** : Le vecteur force dépend de chaque point. Pour une charge source positive, c'est un champ vectoriel, radial dirigé vers l'extérieur et indépendant de la direction. (Symétrie sphérique).

**Le vecteur  $\vec{E}$  a**

- pour origine : un point de l'espace
- pour direction : celle de la force électrique  $\vec{F}_{el}$
- pour grandeur :  $\vec{F}_{el} / q$  ou  $k \cdot Q / d^2$  pour sens :
  - celui de  $\vec{F}_{el}$  si  $q$  est positif
  - le sens contraire de  $\vec{F}_{el}$  si  $q$  est négatif.

### Exemple

Une charge  $q = 2 \mu\text{C}$  est placée en un point  $P$ . Elle subit une force électrique de module  $F_{el} = 10 \text{ mN}$ . Quel est le module du champ électrique au point  $P$ .

**Solution**

Il suffit d'appliquer la formule :  $\vec{E} = \frac{\vec{F}_{el}}{q} \rightarrow E = \frac{F_{el}}{q} = \frac{10 \times 10^{-3}}{2 \times 10^{-6}} = 5 \times 10^3 \text{ N/C}$

**Note** : Dans un souci de simplification des écritures, à partir de maintenant, une grandeur vectoriel sera indiquée par une flèche surmontant le symbole. Le module de ce vecteur sera désigné par le même symbole mais sans la flèche.  $\vec{F}_{el}$  désigne

donc le vecteur force électrique.  $F_{el}$  désigne le module de la force électrique. **Autrement dit  $\overline{F_{el}}$  n'est pas un nombre mais  $F_{el}$  est bel et bien un nombre.**

Source	Intensité du champ (N/C)
Rayonnement de fond de l'Univers	$3 \times 10^{-6}$
Fils électriques dans les maisons	$10^{-2}$
Ondes radio	$\approx 10^{-1}$
Extérieur d'un bâtiment électrifié	$\approx 10^{-1}$
Centre d'une salle de séjour	$\approx 3$
Dans un tube fluorescent	10
À 30 cm d'une horloge électrique	15
À 30 cm d'une chaîne stéréo	90
Rayon laser (faible puissance)	$10^2$
Atmosphère (en beau temps)	$\approx 150$
À 30 cm d'une couverture électrique	250
Produit par l'éclaboussement de l'eau d'une douche	800
Lumière du soleil (moyenne)	$10^3$
Atmosphère (temps orageux)	$10^4$
Accélérateur Van de Graaff	$2 \times 10^6$
Décharge dans l'air	$3 \times 10^6$
Tube à rayons X	$5 \times 10^6$
Membrane d'une cellule	$10^7$
Créé par un laser à impulsions	$5,7 \times 10^{11}$
Subi par l'électron d'un atome d'hydrogène	$6 \times 10^{11}$
À la surface d'un pulsar	$\approx 10^{14}$
À la surface du noyau d'uranium	$2 \times 10^{21}$

Le tableau ci-dessous donne quelques idées des ordres de grandeurs des champs électriques rencontrés dans la nature.

**Exemple**

Une charge  $Q = 5 \mu\text{C}$  est placée en un point A. Soit un point B situé à 10 cm de A. Quel est le champ électrique au point B ? Si maintenant, on place une charge  $q = 3 \mu\text{C}$  au point B, quelle sera la force subie par q ?

**Solution**

a) On applique la définition de E :

$$E = \frac{kQ}{d^2} = \frac{9 \times 10^9 \times 5 \times 10^{-6}}{(0.1)^2} = 4.5 \times 10^6 \text{ N/C}$$

b) On transforme la formule :  $E = \frac{F_{el}}{q}$

$$\rightarrow F_{el} = Eq = 4.5 \times 10^6 \times 3 \times 10^{-6} = 13.5 \text{ N}$$

**5.2.2 Permittivité et permittivité relative**

Pour des raisons, qui n'apparaissent que lorsque l'on développe les équations du champ électrique des différentes distributions de charge, on proposa de poser :

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon}$$

La constante  $\epsilon$  est appelée *permittivité*. Dans le cas du vide :

$$k_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \text{ avec } \epsilon_0 = 8.8541878 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$$

$\epsilon_0$  est la *permittivité du vide*. On définit alors :

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad \begin{array}{l} \epsilon_r \text{ Permittivité relative} \\ \epsilon_0 \text{ Permittivité du vide} \\ \epsilon \text{ Permittivité du milieu} \end{array}$$

Substance	Permittivité [ $\text{C}^2/\text{Nm}^2$ ]	Perm.relative ( $\epsilon/\epsilon_0$ )
Le vide	$8.85 \times 10^{-12}$	1.00000
Air	$8.85 \times 10^{-12}$	1.00054
Corps humain	$71 \times 10^{-12}$	8
Verre	$44 \times 10^{-12} - 89 \times 10^{-12}$	5 - 10
Mica	$27 \times 10^{-12} - 53 \times 10^{-12}$	3 - 6
Nylon	$31 \times 10^{-12}$	3.5
Papier	$18 \times 10^{-12} - 35 \times 10^{-12}$	2 - 4
Polyéthylène	$20 \times 10^{-12}$	2.3
Polystyrène	$23 \times 10^{-12}$	2.6
Caoutchouc	$18 \times 10^{-12} - 27 \times 10^{-12}$	2 - 3
Huile de silicone	$19 \times 10^{-12} - 25 \times 10^{-12}$	2.2 - 2.8
Téflon	$19 \times 10^{-12}$	2.1
Ethanol (25°)	$2.2 \times 10^{-10}$	24.3
Méthanol (20°)	$3.0 \times 10^{-10}$	33.6
Eau (20°)	$7.1 \times 10^{-10}$	80

**Exemple**

Une charge ponctuelle de  $10 \mu\text{C}$  baigne dans l'eau de permittivité relative  $\epsilon_r = 80$ . Calculer le champ électrique à 20 cm de cette charge.

**Solution**

Le champ d'une charge ponctuelle est  $E = \frac{kq}{r^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2}$  avec  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ ,

donc : 
$$E = \frac{10 \times 10^{-6}}{4\pi \times 80 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 0.2^2} = 28 \text{ kN/C}$$

### 5.2.3 Spectre électrique – Représentation du champ électrique

#### 5.2.3.1 Cas d'une seule charge ponctuelle.

Pour visualiser le champ électrique au voisinage d'une charge, prenons une plaque de verre sur laquelle on place des électrodes reliées à la machine de Wimshurst.

Saupoudrons la plaque de graines et pour diminuer les frottements ajoutons de l'huile ou du tétrachlorure de carbone. Actionnons la machine et observons l'orientation des grains.

Nous observons des lignes qui caractérisent l'espace du point de vue électrique. Ces lignes sont appelées *lignes de champ électrique*.

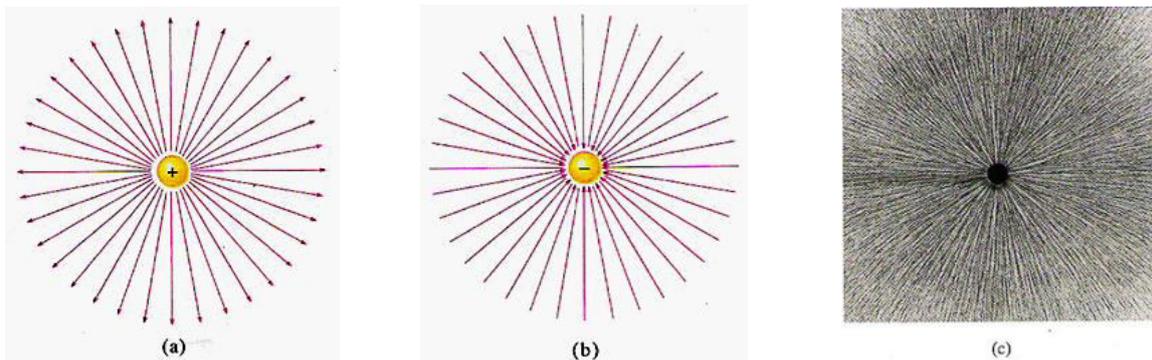
« Le champ électrique  $E$  tourne le dos au + et point vers le – »

Il est indépendant de la charge épreuve placée au point considéré

#### Représentation de $E$



Figure 14.13

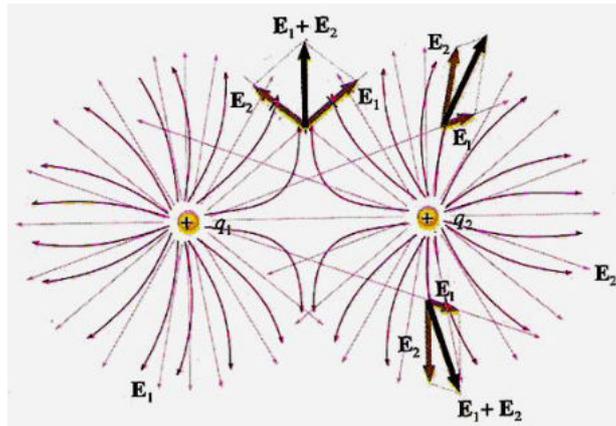


**Figure 14.14 :** (a) Les lignes de champ électrique divergent à partir d'une charge positive. (b) Les lignes de champ convergent vers une charge ponctuelle négative. (c) De fines graines suspendues dans l'huile tendent à s'aligner au voisinage d'un objet chargé. Cet agencement peut être considéré comme un révélateur des lignes de champ électrique.

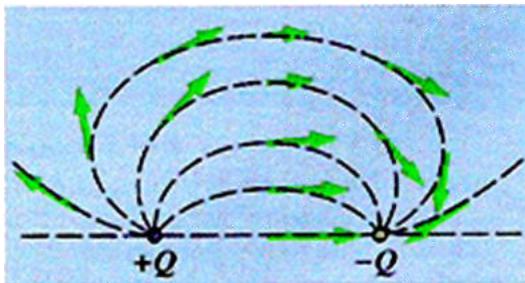
#### 5.2.3.2 Cas de deux charges ponctuelles.

Le champ électrique étant une grandeur vectorielle le principe de superposition est d'application.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$



**Figure 14.15 :** Les deux champs  $\vec{E}_1$  et  $\vec{E}_2$  se superposent et coexistent sans interagir. Le champ total  $\vec{E}$  est la somme vectorielle des deux champs. Dans ce diagramme en chaque point de l'espace  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ . Les lignes de  $\vec{E}$  ne se rencontrent jamais

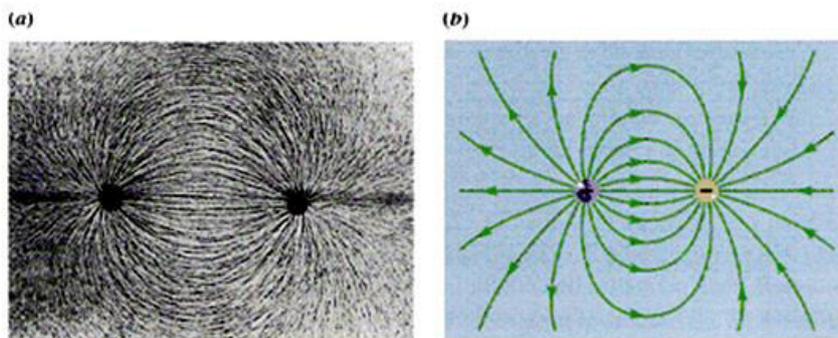


On voit de suite que *ces lignes de champ possèdent la propriété d'être tangentes en tout point au vecteur champ électrique  $\vec{E}$ .*

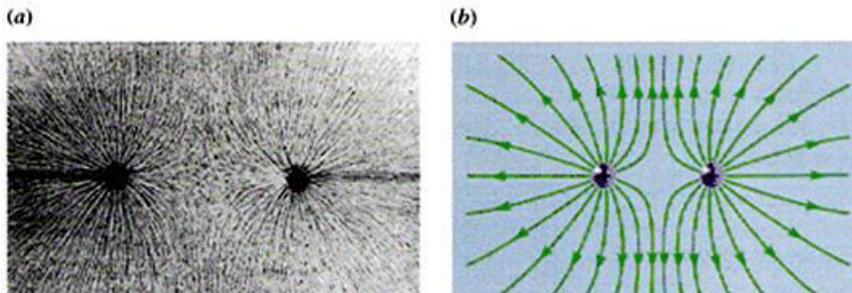
**Figure 14.16 :** La direction du champ électrique en un point est tangente à la ligne de champ.

Connaître un espace électrostatiquement, c'est déterminer l'ensemble des vecteurs  $\vec{E}$  en tout point de cette espace.

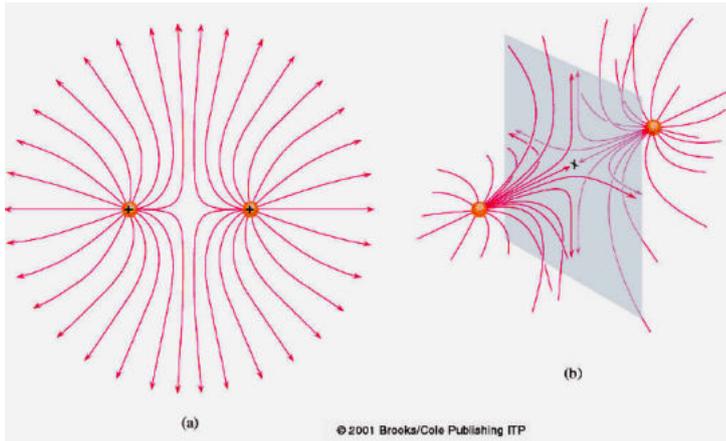
*Une ligne de champ électrique est donc une courbe tangente au vecteur  $E$  en chacun de ces points. L'ensemble de ces lignes forme un spectre électrique. Le sens de ces lignes va toujours de la charge + vers la charge -. Elles sont en fait orientées dans le même sens que le vecteur  $E$ .*



**Figure 14.17 :** Le champ électrique produit par deux charges de mêmes grandeur et de signes opposés. (a) La configuration des semences saupoudrées à la surface d'un liquide. (b) Les lignes de champ



**Figure 14.18:** Le champ électrique produit par deux charges identiques. (a) La configuration des semences. (b) Les lignes de champ électrique.

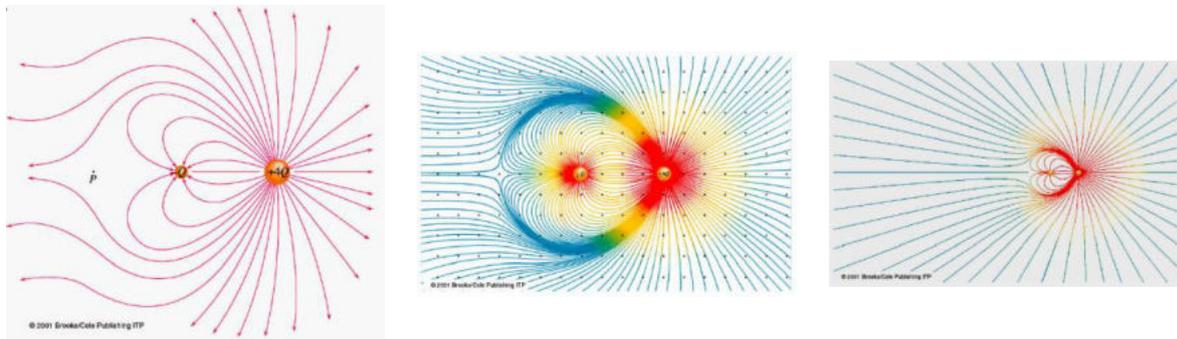


**Figure 14.19 :** Représentation à deux dimensions et à trois dimensions du champ électrique entre deux charges de même signe.

**Remarques :**

1) On notera que le champ électrique s'étend dans l'espace à trois dimensions. Si les dessins sont représentés à 2 dimensions c'est pour une question de facilité. (Figure 14.19)

2) Dans les cas de charges différentes, les diagrammes des champs deviennent vite très compliqués. (Figure 14.20)



**Figure 14.20 :** Vue à différents zooms d'un champ électrique entre une charge  $-Q$  et  $+4Q$

**Exemple**

Deux charges ponctuelles chacune de  $+10\text{nC}$ , sont fixées à une distance de  $8.0\text{m}$ . Calculer le champ électrique aux points  $A$ ,  $B$  et  $C$ .

**Solution**

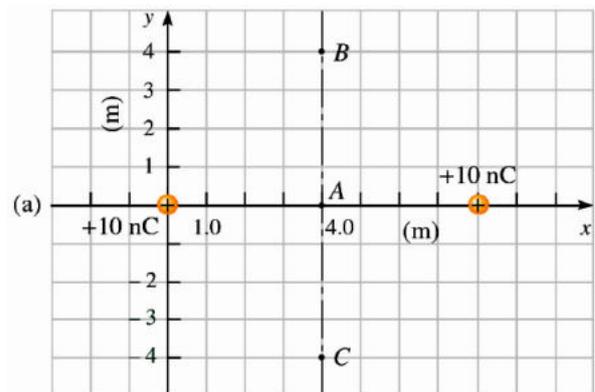
Le point  $A$  est équidistant des deux charges. Leurs champs à ce point,  $\vec{E}_1$  et  $\vec{E}_2$  ont le même module mais sont dirigés dans les directions  $-x$  et  $+x$ , respectivement. Leur somme vectorielle est nulle.

Les points  $B$  et  $C$  se trouvent aussi sur l'axe de symétrie des deux charges. Les modules des deux champs sont par conséquent égaux :

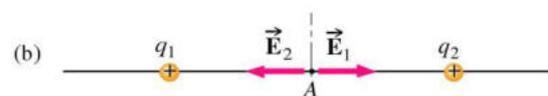
$$E_1 = E_2 = \frac{kq}{d^2} = \frac{9 \times 10^9 \times 10 \times 10^{-9}}{(4 / \sin 45^\circ)^2} = 2.81 \text{ N/C}$$

De par la géométrie, les vecteurs sont inclinés à  $45^\circ$ . Les composantes horizontales des deux vecteurs sont égales et de signes opposés, leur somme est nulle. La composante verticale totale est :

$$E_B = E_1 \sin 45 + E_2 \sin 45 = 2 \times 2.81 \times 0.707 = 4 \text{ N/C}$$



© 2001 Brooks/Cole Publishing (TP)



dirigée vers le haut. Par symétrie,  $E_C = 4.0 \text{ N/C}$ , mais dirigée vers le bas.

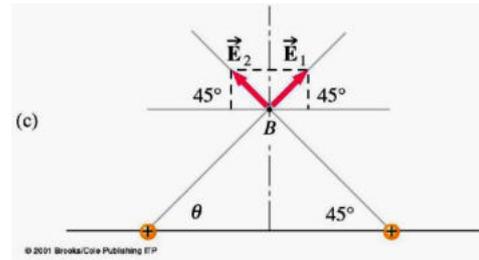


Figure 14.21 : Trouvez les champs électriques de deux charges  $q_1$  et  $q_2$  aux points  $A, B, C$

### 5.2.3.3 Cas des charges non-ponctuelles.

Quelques cas donnés à titre d'exemples

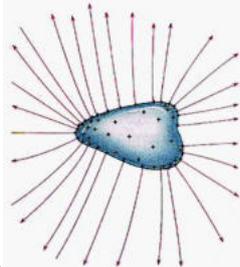


Figure 14.22 : Le champ électrique d'un conducteur chargé est partout perpendiculaire à sa surface. La charge se concentre sur les régions à faible rayon de courbure.

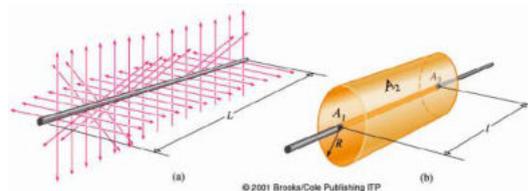


Figure 14.23 : Les lignes de champ d'un conducteur rectiligne de longueur infinie et uniformément chargé.

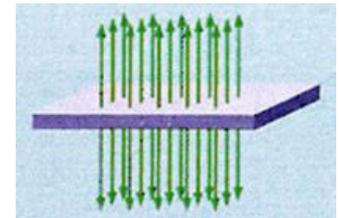


Figure 14.24 : Les lignes de champ d'une plaque infinie uniformément chargée

### 5.2.4 Champ uniforme

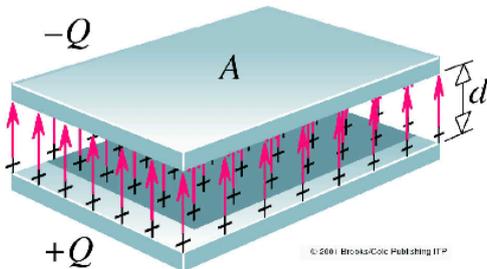


Figure 14.25

A l'aide de 2 plaques métalliques, rectilignes et // chargées de signe contraire nous observons entre les plaques, des lignes de champ // entre elles et  $\perp$  aux plaques. (Figure 14.25)

*Entre les plaques, le vecteur champ garde toujours la même direction, le même sens et la même grandeur : on dit que le champ est uniforme. (Figure 14.26)*

Attention : le champ n'est uniforme qu'à l'intérieur des plaques. Aux extrémités des plaques, il y a un effet de bord (voir figure 14.27)

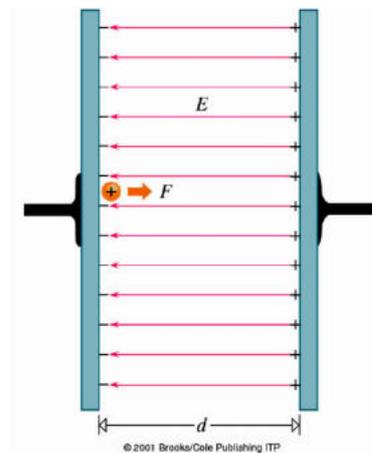


Figure 14.26:

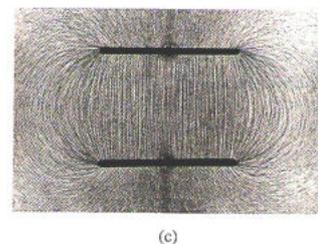
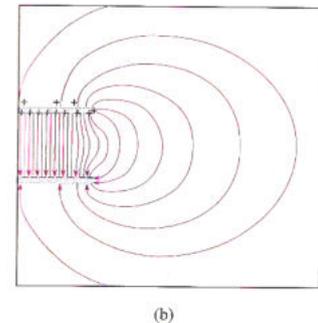
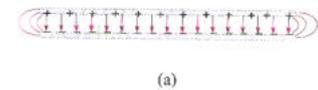


Figure 14.27 (a) Le champ électrique d'un condensateur plan (b) Vue rapprochée de l'effet de bord. (c) Le champ révélé par des fibres de rayon suspendues dans l'huile.

## 6. Différence de potentiel électrique

### 6.1 Energie potentielle électrique

Soulever un cartable, tendre un élastique,.. sont des actions qui demandent de l'énergie. Celle-ci, une fois dépensée, se retrouve stockée sous forme d'énergie potentielle :

- *gravifique* pour le cartable
- *élastique* pour le ressort

On peut la récupérer en lâchant le cartable ou en libérant l'élastique.

De même, frotter deux objets neutres l'un contre l'autre pour les électriser, nécessite aussi une dépense d'énergie. Dans le cas des corps électrisés, il y a aussi stockage d'énergie sous forme d'énergie potentielle *électrique*. En effet si l'accumulation de charges est suffisante, une étincelle peut jaillir.

### 6.2 Potentiel électrique en un point situé près d'une charge Q

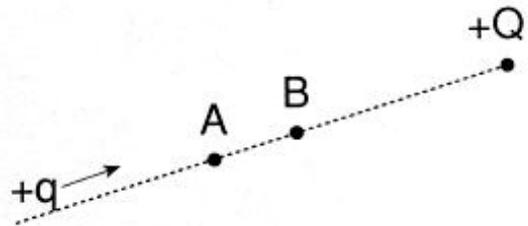
Supposons une charge  $+Q$  placée en un point A de l'espace (sur un support isolant)

Soit une charge  $+q$  située très loin de la première (à l'infini). Si on désire amener la charge  $q$  au point A, on doit lutter contre une force répulsive et donc produire un travail physique  $W$ .

Cela demande de l'énergie qui sera stockée sous forme d'énergie potentielle électrique. En effet si on lâche la charge, elle se met en mouvement.

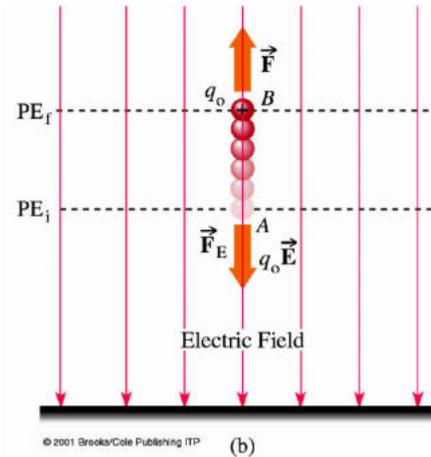
Si on amène 2 charges  $+2q$  au point A, le travail à produire est 2 fois plus grand soit  $2W$

Le rapport du travail fourni sur la charge amenée  $W/q$  est constant.

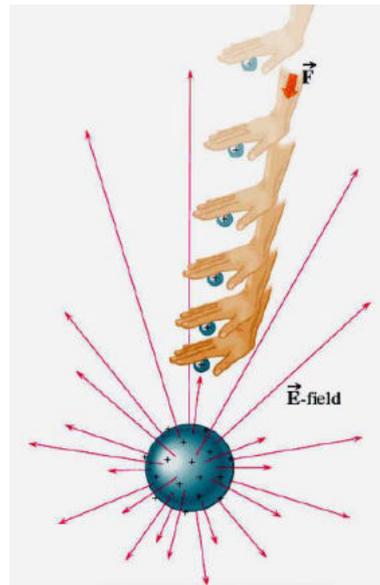


*On appelle potentiel électrique  $V_A$  au point A, l'énergie potentielle électrique acquise par la charge unité (+ 1C) au cours de son déplacement depuis l'infini jusqu'au point A. C'est donc l'énergie par unité de charge. Son unité est le volt (V)*

$V_A = \frac{W_{\infty \rightarrow A}}{q}$	$V_A$	Potential au point A, en V
	$W_{\infty \rightarrow A}$	Energie potentielle électrique, en J
	$q$	Charge, en C



**Figure 16.01** : Un objet de charge  $q_0$  soulevé par une force  $F$  dans un champ électrique uniforme dirigé vers le bas. Le champ électrique agit sur la charge avec une force électrique  $F_{el} = q_0 E$



**Figure 16.02** : Un travail doit être fait pour déplacer une charge malgré le champ électrique qui s'oppose à ce mouvement. Ici, une charge positive est poussée vers une sphère chargée positivement, contre le champ électrique de cette dernière

Remarques

- Le potentiel dépend de la valeur de la charge  $Q$
- le potentiel est + si  $Q$  est + (car il faut fournir un travail pour amener  $q$  en  $A$ )
- le potentiel est – si  $Q$  est – (car il faut retenir la charge  $q$ )
- *Le potentiel est du même signe que la charge  $Q$*

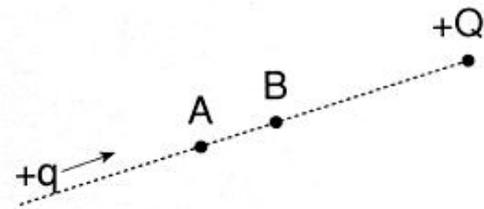
## 6.3 Différence de potentiel entre 2 points

### 6.3.1 La ddp

Par un raisonnement identique on a :  $V_B = \frac{W_{\infty \rightarrow B}}{q}$

avec  $V_B$  plus élevé que  $V_A$  car plus proche de la charge  $Q$ .

Entre  $A$  et  $B$ , il existe une différence de potentiel (en abrégé d.d.p) notée  $U_{AB} = V_B - V_A$



*La d.d.p.  $U_{AB}$  est égale à l'énergie à fournir pour amener une charge unitaire positive du point  $A$  jusqu'au point  $B$*

$$U_{AB} = V_B - V_A = \frac{W_{\infty \rightarrow B}}{q} - \frac{W_{\infty \rightarrow A}}{q} = \frac{W_{A \rightarrow B}}{q}$$

L'unité de d.d.p. est le joule par coulomb appelée le volt (V)

*La d.d.p. entre 2 points  $A$  et  $B$  (aux bornes d'un GN) est de 1 volt s'il faut fournir un travail de 1 J pour déplacer une charge de 1 coulomb de  $A$  vers  $B$ .*

**Plus la d.d.p est grande plus les charges reçoivent de l'énergie**

## Rappel des formules vues en 3<sup>ème</sup>

$U = \frac{P}{I} = \frac{W}{q}$	$U$ ddp, en V	et $I = \frac{q}{t}$	$I$ Intensité du courant, en A
	$P$ Puissance, en W		$q$ Charge électrique, en C
	$I$ Intensité du courant, en A		$t$ Temps, en s
	$W$ Potentiel électrique, en J		
	$q$ Charge électrique, en C		

### Exemples

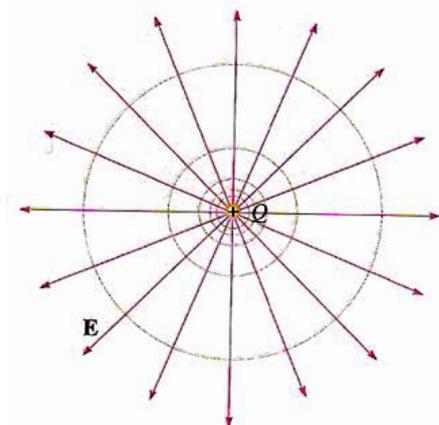
- Une pile de 4,5V lorsqu'elle produit un courant de 0,2A libère une puissance de 0.9W  
Pour qu'une charge de 1C parcoure le circuit, il faut un temps de 5s ; pendant ce temps l'énergie dégagée par le GN est de 4,5J
- Un GN de 220V a une puissance de 1100W lorsqu'il produit un courant de 5A  
Une charge de 1C y circule pendant un temps de 0,2s et elle y libère une énergie de 220J

### 6.3.2 Surfaces équipotentiellles

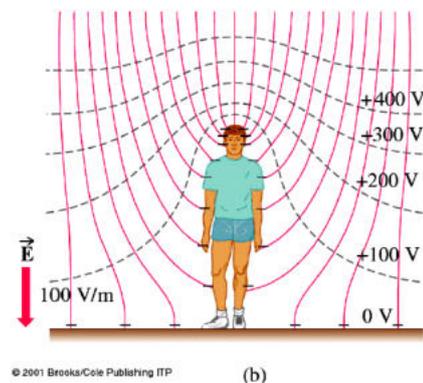
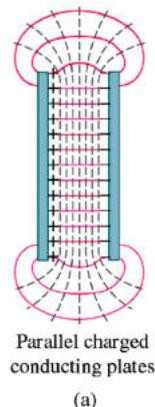
Considérons une charge ponctuelle. Celle-ci détermine autour d'elle un champ électrique. En chaque point de l'espace nous pouvons alors définir un potentiel. Si nous relient les points de l'espace qui sont au même potentiel, nous définissons alors des **surfaces équipotentiellles**.

Il est possible montrer assez facilement que

- En tout point le vecteur champ électrique est perpendiculaire à la surface équipotentielle passant par ce point.
- Lorsqu'une charge se déplace le long d'une surface équipotentielle, alors le travail est nul.



**Figure 16.03** : les lignes de champs et les surfaces équipotentiellles pour une charge ponctuelle. Les surfaces équipotentiellles sont des sphères concentriques centrées sur la charge en  $Q$ .



**Figure 16.04**: Champs électriques et surfaces équipotentiellles. (a) Une paire de plaques conductrices, planes parallèles et chargées. La personne dans (b) est mise à la terre électriquement : son potentiel est alors nul (D'où l'expression populaire pour une personne sans énergie : « Elle est à la masse ! »).

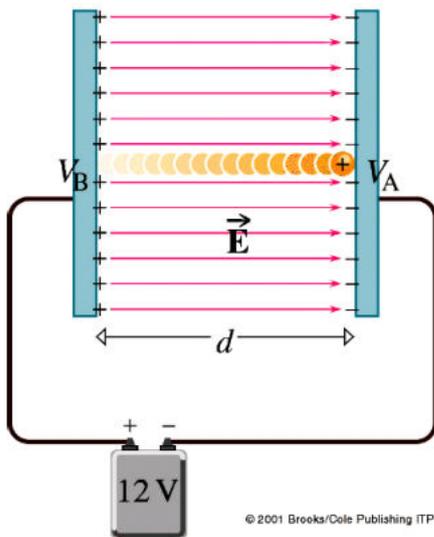
## 6.4 Charge placée entre 2 plaques // chargées de signes contraires

Nous savons que la d.d.p. représente une énergie par unité de charge.

Calculons le travail nécessaire pour déplacer une charge  $-q$  dans un champ uniforme créé entre les 2 armatures // chargées de signes contraires. (Figure 16.05)

La force est donnée par :  $F = E.q$

Le travail de cette force durant le déplacement est :  $W = Fd = Eqd$  (1)



Le travail ainsi réalisé sert à augmenter l'énergie  $W$  de la charge  $q$ , Or nous savons que  $W = U.q$  (2). De (1) et (2), nous déduisons que  $U = E.d$ , c'est-à-dire

$$E = \frac{U}{d}$$

$E$  Champ électrique, en V/m  
 $U$  ddp, en V  
 $d$  Distance en les plaques, en m

Cette formule permet de définir les nouvelles unités du champ électrique : V/m

Figure 16.05

**Exemple**

Quel est le champ électrique entre deux plaques distantes de 2 mm si la différence de potentiel est de 110V.

**Solution :**  $E = \frac{U}{d} = \frac{110}{2 \times 10^{-3}} = 55000 \text{ V/m}$

## 6.5 Mouvement d'une charge dans un champ électrique

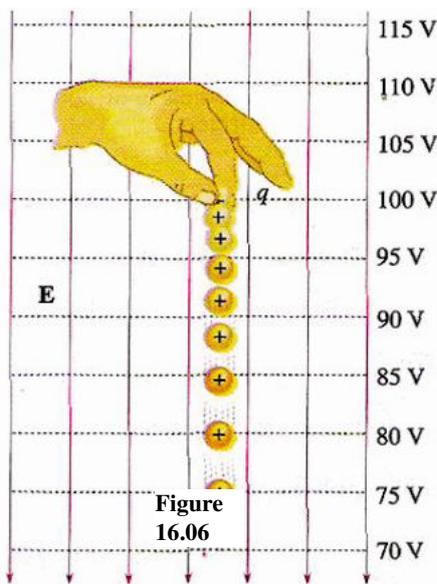


Figure 16.06

En subissant une chute de potentiel de 25 V, la charge perd une énergie potentielle  $25q$  égale à l'énergie cinétique qu'elle gagne.

De la même façon qu'une masse tombe en chute libre dans le champ gravitationnel, une charge électrique « tombera » dans un champ électrique pour aller du potentiel le plus élevé vers le potentiel le plus petit. (Figure 67). La charge va subir une accélération constante et son mouvement sera une MRUA. La variation de l'énergie cinétique de la particule sera égale à la variation de l'énergie potentielle.

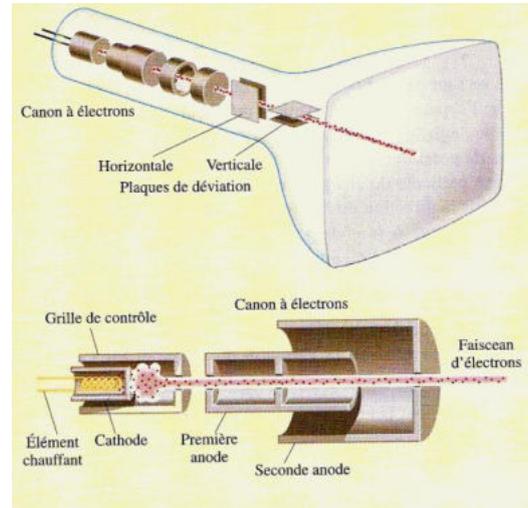
$$\Delta E_c = \Delta E_p \rightarrow \frac{1}{2} m \Delta v^2 = -q \Delta U \rightarrow \Delta v = \sqrt{-\frac{2q \Delta U}{m}}$$

(Question : Pourquoi un - dans le second membre ?)

Profitons-en pour définir l'électron-volt (eV) qui mesure l'énergie acquise par une charge égale à celle de l'électron lorsqu'elle est accélérée par une ddp de 1 V. (1 eV =  $1.6 \cdot 10^{-19}$  J)

**Exemple : Le tube à rayons cathodiques.**

La figure 16.07 représente les éléments de base d'un tube à rayons cathodiques, qu'on trouve dans les oscilloscopes, les moniteurs d'ordinateurs et les téléviseurs. Les électrons sont émis par une cathode chauffée et émergent à travers un micro-trou, attirée par une première anode, portée à un potentiel positif relativement faible. Les électrons sont ensuite accélérés par une seconde anode portée à un potentiel de 8 000 V à 20 000V. Les électrons vont alors frapper l'écran pour produire un stop lumineux. Considérons le cas d'une différence de potentiel de 20 000 V. Calculer la vitesse atteinte par les électrons.



**Figure 16.07** Un tube de rayons cathodiques (voir la Fig. Q19). Un faisceau d'électrons passe entre deux ensembles de deux plaques, une paire horizontale et l'autre verticale. Lorsque les plaques sont chargées de façons appropriées, le faisceau est dévié et frappe un point donné de l'écran fluorescent.

**Solution :**

Données : Masse de l'électron =  $9,1 \times 10^{-31}$  kg  
 Charge de l'électron =  $1,6 \times 10^{-19}$  C

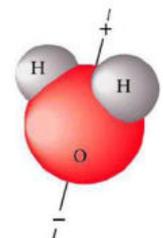
$$\Delta v = \sqrt{-\frac{2q\Delta U}{m}} = \sqrt{-\frac{2 \times 1,6 \times 10^{-19} \times (-2 \times 10^4)}{9,1 \times 10^{-31}}}$$

$$= 8,4 \times 10^7 \text{ m/s} = 84\,000 \text{ km/s}$$

Impressionnant !!!!

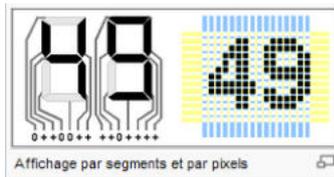
## 7. Quelques applications des champs électriques

Chimie : Les liaisons covalentes polarisées et les liaisons ioniques sont responsables de l'apparition de champs électriques au sein des composés chimiques. Exemple : la molécule d'eau. (Figure 16.08)



**Figure 16.08**

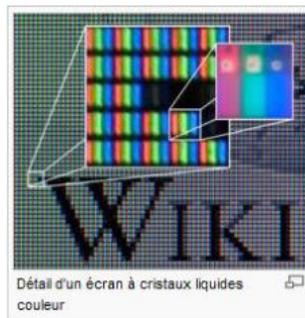
### Les cristaux liquides



**Figure 16.09**

Les affichages à cristaux liquides sont utilisés de plus en plus (écrans de TV, d'ordinateurs, etc.)

Sous l'effet d'un champ électrique, l'orientation des cristaux est modifiée. Ce qui modifie les caractéristiques de la lumière qui passe

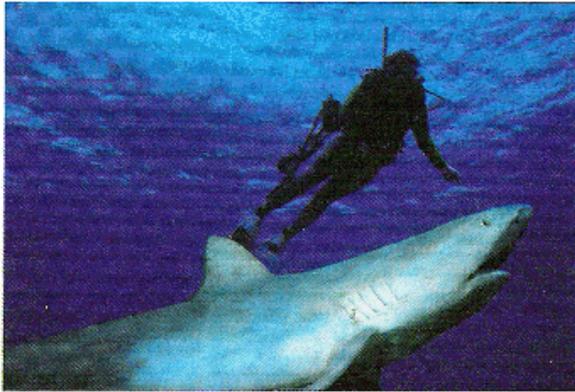


**Figure 16.10**



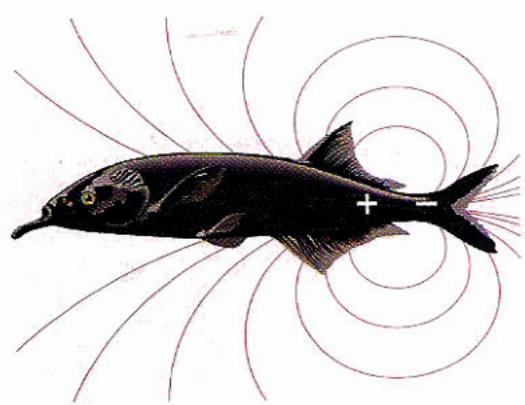
**Figure 16.11**

## Zoologie :



Les cellules électriquement sensibles du requin lui permettent de détecter des champs électriques aussi faibles que ceux qui sont créés par la contraction des muscles de sa proie.

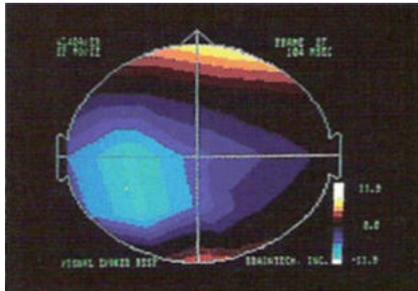
**Figure 16.12**



Le poisson éléphant-gnathonemus produit champ de dipôle électrique et détecte les objets proches par leurs effets sur ce champ.

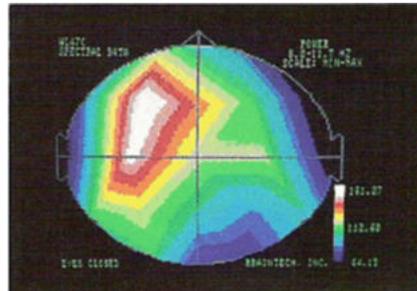
**Figure 16.13**

## Médecine



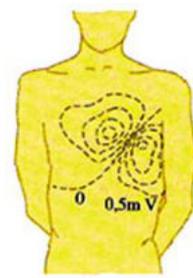
**Figure 16.14**

Les équipotentielles représentées par des couleurs différentes. Il s'agit de potentiels « provoqués » mesurés 0,1 s environ après un stimulus (flash ou déclie).



**Figure 16.15**

L'image de gauche (figure 16.14) révèle la présence d'une tumeur ; celle de droite appartient à un patient atteint d'épilepsie



**Figure 16.16**

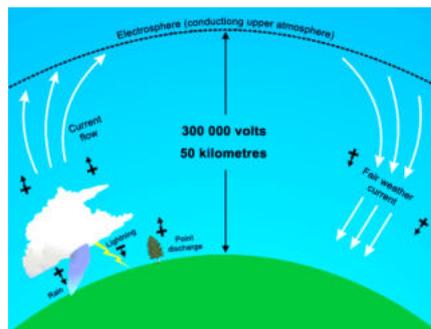
Surfaces équipotentielles (en millivolts), à un certain instant à l'intérieur d'un thorax humain dues à l'activité du cœur.

## Autres exemples



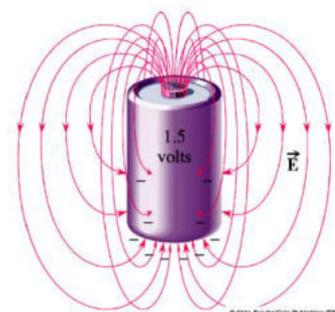
**Figure 16.17**

Les lignes électriques dans les zones rurales sont souvent à haute tension (plusieurs centaines de milliers de volts). La chute de potentiel par mètre de la ligne au sol peut être assez élevée. C'est suffisant pour allumer ces tubes fluorescents que tient cet agriculteur.



**Figure 16.18**

La chute de tension entre les parties hautes de l'atmosphère peut atteindre 300 000 V



**Figure 16.19**

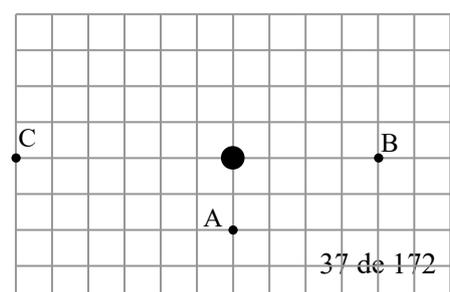
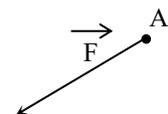
Champ électrique autour d'une pile de 1.5 V

## 8. Exercices d'électrostatique

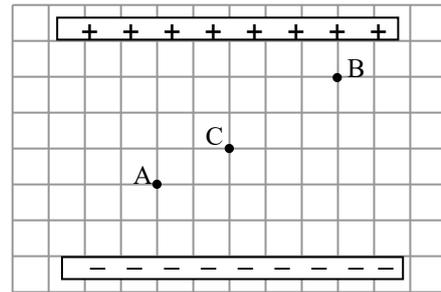
### 8.1 Exercices qu'il faut savoir faire

- 1) Énoncez la loi de Coulomb.
- 2) Citez (en français) les différents facteurs intervenant dans la loi de Coulomb. Indiquez leurs unités SI.
- 3) Trouvez l'unité SI de la constante  $k$  apparaissant dans la loi de Coulomb.
- 4) La loi de Coulomb est une loi en  $1/d^2$ . Représenter sur un graphique la fonction  $1/d^2$  en fonction de  $d$ . Montrer par des calculs simples que la force électrique diminue rapidement avec la distance  $d$ .
- 5) Quelle est l'intensité et la direction de la force appliquée à une charge de  $+4.10^{-9}$  C située à 5 cm d'une charge de  $+5.10^{-8}$  C ? {Rép :  $7,2.10^{-4}$  N}
- 6) Quelle est l'intensité et la direction de la force appliquée à une charge de  $+4.10^{-9}$  C située à 5 cm d'une charge de  $+5.10^{-8}$  C ? {Rép :  $7,2.10^{-4}$  N}
- 7) Définissez le vecteur champ électrique en un point.
- 8) Quelle est l'unité SI de la valeur du vecteur champ électrique ?
- 9) Qu'est-ce qu'une ligne de champ électrique ? Quelles sont ses propriétés ?
- 10) Dessinez le spectre d'un champ électrique uniforme.
- 11) Dessinez le spectre d'un champ électrique produit par une charge ponctuelle positive (négative).
- 12) Décrivez l'expérience faite en classe pour obtenir un champ uniforme. Expliquez comment on peut visualiser le spectre de ce champ.
- 13) Décrivez l'expérience faite en classe pour obtenir un champ radial. Expliquez comment on peut visualiser le spectre de ce champ.
- 14) Si on multiplie par 5 la distance séparant deux objets chargés, que deviennent les forces électriques entre ces deux objets ?
- 15) Deux corps ponctuels chargés sont placés au voisinage l'une de l'autre. Si l'on multiplie par quatre la distance entre ces corps, sans modifier leur charge, la valeur des forces électriques entre ceux-ci
  - est multipliée par 16
  - est multipliée par 4,
  - est multipliée par 2,
  - est divisée par 2,
  - est divisée par 4,
  - est divisée par 16.
 Choisissez la bonne réponse et justifiez votre choix.
- 16) Deux corps ponctuels chargés sont placés en  $A$  et en  $B$ . Si l'on multiplie par 4 la charge du corps placé en  $A$ , sans modifier la charge de l'autre corps ni la distance qui les sépare, pouvez-vous dire que
  - la force exercée sur  $A$  est multipliée par 4 et la force exercée sur  $B$  reste la même,
  - la force exercée sur  $A$  reste la même et la force exercée sur  $B$  est multipliée par 4,
  - la force exercée sur  $A$  et la force exercée sur  $B$  sont multipliées par 4 toutes deux.
  - la force exercée sur  $A$  et la force exercée sur  $B$  sont divisées par 4 toutes deux.
  - la force exercée sur  $A$  et la force exercée sur  $B$  sont divisées par 16 toutes deux.
 Choisissez la bonne réponse et justifiez votre choix.
- 17) Deux corps ponctuels chargés sont placés en  $A$  et en  $B$ . Si l'on multiplie par trois la charge du corps placé en  $A$ , que deviennent  $F_A$  et  $F_B$ , les valeurs des forces exercées sur le corps placé en  $A$  et en  $B$  ?
- 18) Deux charges  $q_1$  et  $q_2$  exercent l'une sur l'autre des forces attractives lorsqu'elles sont séparées par une distance  $d$ . Que deviennent ces forces si  $q_1$  est multipliée par trois et  $q_2$  divisée par 2 ?

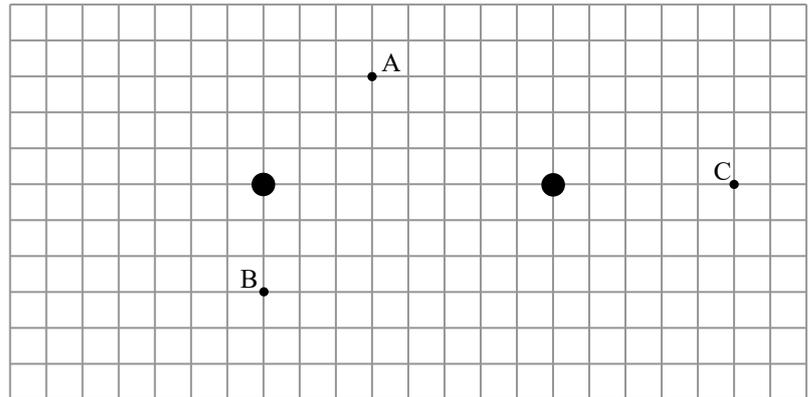
- 19) Un objet  $A$  porte une charge de  $3 \mu\text{C}$  et un objet  $B$  porte une charge de  $-1 \mu\text{C}$ . Quel est celui qui exerce la force électrique la plus grande sur l'autre,  $A$  ou  $B$  ? Justifiez votre réponse.
- 20) Calculez la valeur des forces de Coulomb existant entre deux électrons distants de  $10^{-10}$  m. La charge d'un électron vaut  $-1,6 \times 10^{-19}$  C.
- 21) Calculez la valeur des forces de Coulomb s'exerçant entre un proton et un électron distants de  $10^{-10}$  m. La charge d'un électron vaut  $-1,6 \times 10^{-19}$  C.
- 22) Comparer la valeur du poids de l'électron à celle de la force électrique l'attirant vers le noyau dans l'atome d'hydrogène à l'état normal.  
(On donne masse de l'électron :  $9,1 \cdot 10^{-31}$  kg et rayon de l'atome :  $5 \cdot 10^{-2}$  nm)  
{Rép : le rapport  $F$  sur  $G = 10^{22}$ }
- 23) Un petit objet portant une charge électrique de  $3 \mu\text{C}$  est attiré avec une force de  $5,4$  N par un autre petit objet chargé situé à  $10$  cm de lui. Les deux objets sont dans le vide. Quelle est la charge portée par le second objet ?
- 24) Deux petites sphères conductrices placées dans le vide portent respectivement des charges de  $6$  nC et  $-3 \mu\text{C}$ . Elles sont distantes de  $4$  cm (distance centre à centre). Quelle est la valeur des forces électriques qui s'exercent entre elles ? Représentez ces forces sur un schéma.
- 25) Un petit objet portant une charge de  $-5,0 \mu\text{C}$  est attiré avec une force de  $10$  N par un autre objet portant une charge de  $2,3 \mu\text{C}$ . Les deux objets sont dans le vide. Quelle est la distance qui les sépare ?
- 26) Deux charges, l'une de  $+5 \cdot 10^{-7}$  C et l'autre de  $-2 \cdot 10^{-7}$  C s'attirent l'une l'autre avec une force de  $100$  N . A quelle distance l'une de l'autre se trouvent-elles ? {Rép :  $3$  mm}
- 27) Deux charges ponctuelles de  $2,1 \mu\text{C}$  et de  $3,2 \mu\text{C}$  sont séparées de  $5$  cm. Déterminer l'intensité de la force électrique agissant sur la charge de  $2,1 \mu\text{C}$ . Comparer cette force à celle exercée sur la charge de  $3,2 \mu\text{C}$ .
- 28) Un corps  $A$  portant une charge de  $+8 \cdot 10^{-8}$  C est placé sur le segment d'une droite qui joint 2 corps électrisés  $B$  et  $C$  ( $+2 \cdot 10^{-8}$  C et  $-1 \cdot 10^{-7}$  C) . Trouver la résultante des forces en  $A$  si  $AB = 5$  cm et  $AC = 10$  cm. {Rép :  $13 \cdot 10^{-3}$  N}
- 29) Une balle de masse  $90$  mg et de charge  $+0,01 \mu\text{C}$  est repoussée avec une force égale à son poids lorsqu'elle se trouve dans l'air à  $10$  cm au-dessus d'une sphère électrisée négativement. Quelle est la charge de la sphère ? {prendre  $g = 10$  N/kg et Rép =  $0,1 \mu\text{C}$ }
- 30) Un objet considéré comme ponctuel porte une charge de  $-6 \mu\text{C}$ . Il subit une force électrique de  $2 \times 10^{-2}$  N dirigée verticalement vers le haut. Quelles sont les caractéristiques du champ électrique à l'endroit où se trouve cet objet ?
- 31) Calculer le champ électrique à une distance de  $30$  cm d'une charge  $Q_1 = 5 \cdot 10^{-9}$  C située dans l'air.  
{Rép :  $500$  N/C}
- 32) Trouver le champ électrique à mi-chemin entre 2 charges ponctuelles de  $+20 \cdot 10^{-8}$  C et  $-5 \cdot 10^{-8}$  C distantes de  $10$  cm. Quelle serait la force exercée sur une charge de  $+4 \cdot 10^{-8}$  C placée en ce point ?
- 33) Quels seraient le champ et la force exercés sur une charge de  $4 \cdot 10^{-8}$  C si on remplaçait la charge de  $-5 \cdot 10^{-8}$  C par une de  $+5 \cdot 10^{-8}$  C ? {Rép :  $9 \cdot 10^{+5}$  V/m ;  $3,6 \cdot 10^{-2}$  N ;  $54 \cdot 10^4$  V/m ;  $2,2 \cdot 10^{-2}$  N}
- 34) Un objet considéré comme ponctuel placé au point  $A$  porte une charge de  $-6 \mu\text{C}$ . Il subit une force électrique de  $2 \times 10^{-2}$  N (voir schéma ci-contre). Quelles sont les caractéristiques du champ électrique au point  $A$  ?



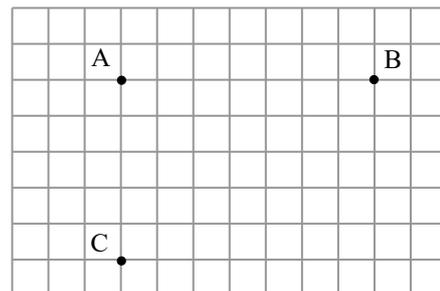
- 36) Deux plaques métalliques portant des charges de signes opposés (mais de même valeur) produisent un champ électrique. Représentez le spectre de ce champ entre les deux plaques et indiquez le vecteur champ électrique aux points A, B et C du schéma ci-contre en respectant les valeurs relatives de ce champ (flèche  $x$  fois plus longue là où le champ est  $x$  fois plus grand).



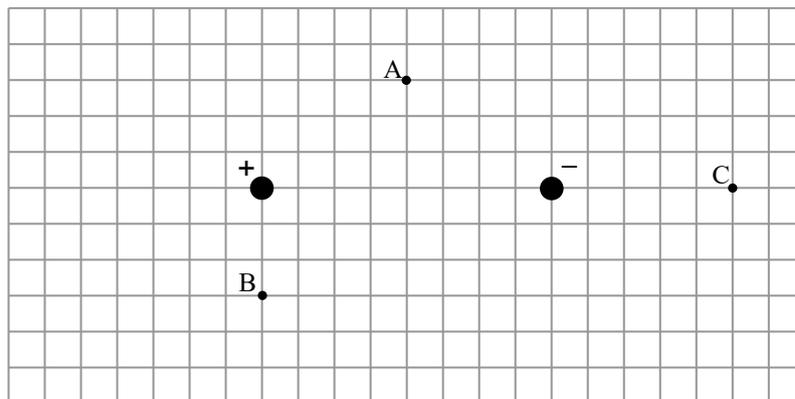
- 37) Deux petites sphères portant la même charge positive (négative) produisent un champ électrique. Représentez le spectre de ce champ et indiquez le vecteur champ électrique aux points A, B et C du schéma ci-dessous en respectant les valeurs relatives de ce champ (flèche plus longue là où le champ est plus grand).



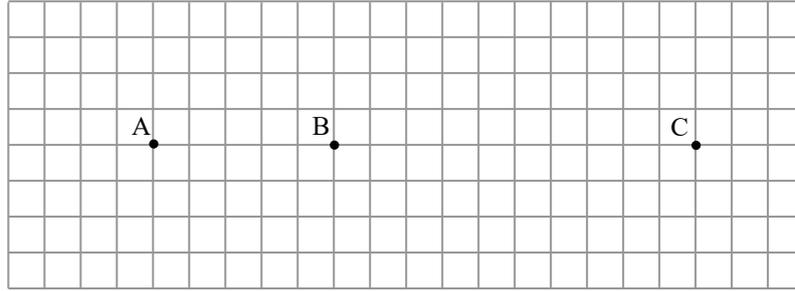
- 38) Quelle est la résultante des forces électriques subies par l'objet A (l'objet C), sachant que  $q_A = -1 \mu\text{C}$ ,  $q_B = 3 \mu\text{C}$  et  $q_C = -2 \mu\text{C}$ . Les trois objets chargés sont dans le vide. (Le schéma est à l'échelle, le côté d'un carré mesure 1 cm.)



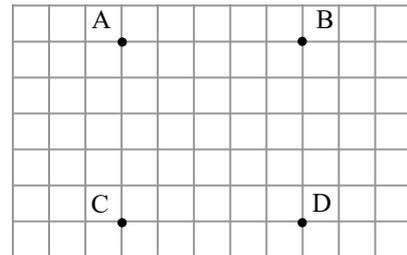
- 39) Deux petites sphères chargées, l'une positivement et l'autre négativement (mais de même valeur), produisent un champ électrique. Représentez le spectre de ce champ et indiquez le vecteur champ électrique aux points A, B et C du schéma ci-dessous en respectant les valeurs relatives de ce champ (flèche plus longue là où le champ est plus grand).



40) Quelle est la résultante des forces électriques subies par l'objet A (l'objet B, l'objet C), sachant que  $q_A = -1 \mu\text{C}$ ,  $q_B = 2 \mu\text{C}$  et  $q_C = -3 \mu\text{C}$ . Les trois objets chargés sont dans le vide. (Le schéma est à l'échelle, le côté d'un carré mesure 1 cm.)



41) Quelles sont les résultantes des forces électriques subies par chaque objet (A, B, C et D), sachant qu'ils portent la même quantité d'électricité  $q = 2 \mu\text{C}$ . Dessinez ces résultantes à l'échelle. Les quatre objets chargés sont dans le vide. (Le schéma est à l'échelle, le côté d'un petit carré mesure 1 cm.)



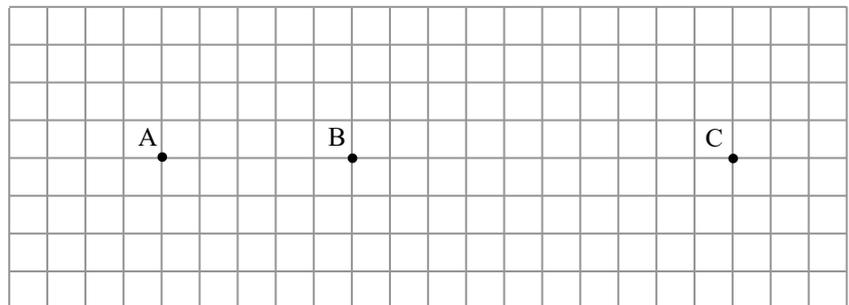
42) Une différence de potentiel de 20 V est appliquée à 2 plaques // et un champ électrique de 500 V/m est ainsi produit. Quelle est la distance entre les plaques ? {Rép : 4 cm}

43) Calculer la vitesse acquise par des électrons accélérés par une différence de potentiel de 150 V. (7300 km/s)

44) Calculer la vitesse d'un faisceau d'électrons accélérés par une différence de potentiel de 300 V. Calculer l'énergie cinétique en joules et en électronvolts. ( $v = 1,027 \text{ m/s}$  ;  $4,8 \times 10^{-17} \text{ J}$  ; 300 eV)

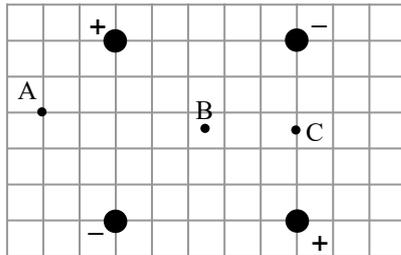
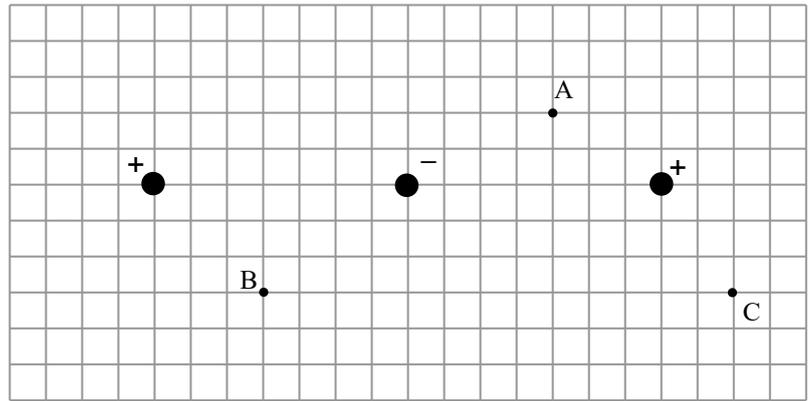
## 8.2 Exemples de questions d'évaluation des compétences

1) Étant donné un spectre (non vu en classe), pouvoir dessiner le vecteur champ électrique en un point. Si on demande de dessiner le vecteur champ en plusieurs points du spectre, on peut éventuellement demander de respecter (de manière qualitative) la valeur relative du champ.

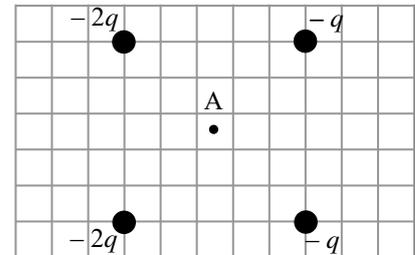


2) L'objet A représenté sur le schéma ci-dessus porte une charge  $q_A = -1 \mu\text{C}$ . L'objet B, porte une charge  $q_B = 2 \mu\text{C}$ . Quelle devrait être la charge portée par l'objet placé en C pour que A soit en équilibre. Justifiez votre Réponse. Les trois objets chargés sont dans le vide. (Le schéma est à l'échelle, le côté d'un carré mesure 1 cm.)

- 3) Trois petites sphères portent des charges électriques de mêmes valeurs (les signes sont indiqués sur le schéma). Ces charges produisent un champ électrique. Représentez de façon approximative le spectre de ce champ et indiquez le vecteur champ électrique aux points A, B et C du schéma. (Variante : uniquement dessiner le vecteur champ électrique en A, B, C.)



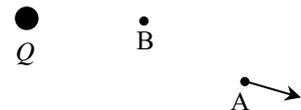
- 4) Quatre petites sphères portent des charges électriques de mêmes valeurs. Deux sont positives, deux sont négatives (voir schéma). Ces charges produisent un champ électrique. Représentez de façon approximative le spectre de ce champ et indiquez le vecteur champ électrique aux points A, B et C du schéma. (Variante : uniquement dessiner le vecteur champ électrique en A, B, C.)



- 5) Quatre petites sphères disposées en carré portent des charges négatives. Deux portent une charge  $-q$  et les deux autres portent une charge  $-2q$  (voir schéma ci-contre). Représentez le vecteur champ électrique résultant produit par ces quatre charges au centre de ce carré (point A du schéma).

C.

- 6) Une charge électrique  $Q$  portée par un objet ponctuel produit un champ électrique. Représentez le vecteur champ électrique aux points B et C en vous basant sur sa représentation en A.



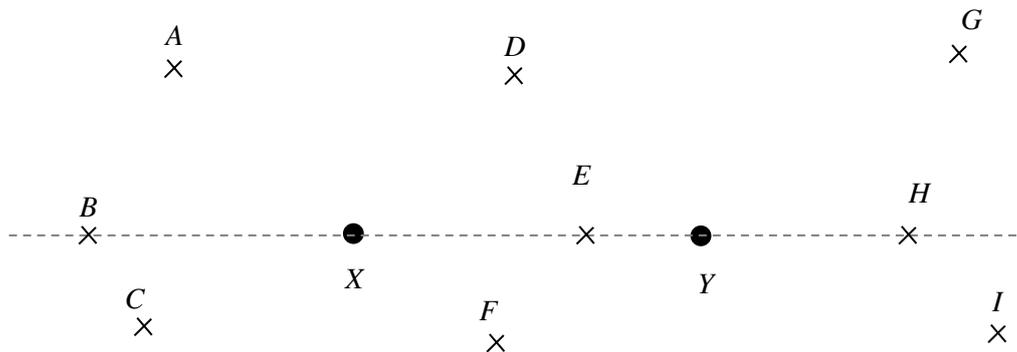
- 7) Si l'on chargeait la Terre et la Lune de telle manière que la force électrique ait la même valeur que la force d'interaction gravitationnelle et soit de sens opposé, la Lune cesserait de tourner autour de la Terre et s'éloignerait d'un mouvement rectiligne uniforme. Calculez la charge de la Terre et la charge de la Lune qui seraient nécessaires. Quels seraient les signes de leurs charges ?  
Pour simplifier les calculs, on supposera que les deux charges sont égales en valeur absolue et que la Terre et la Lune sont ponctuelles.

Rappel : la valeur de la force de gravitation est donnée par

$$F = G \frac{m_T m_L}{r^2}$$

où  $G$  est la constante de gravitation universelle,  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ (m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}\text{)}$ ,  
 $m_T$  est la masse de la Terre,  $m_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ ,  
 $m_L$  est la masse de la Lune,  $m_L = 7,35 \times 10^{22} \text{ kg}$ ,  
 $r$  est la distance entre la Terre et la Lune (entre les centres),  $r = 385 \text{ 000 km}$ .

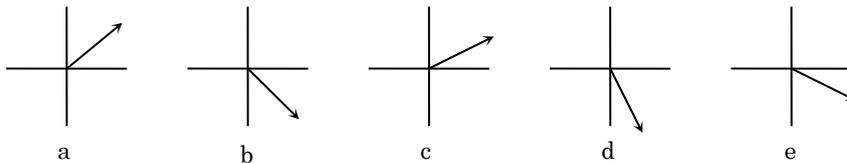
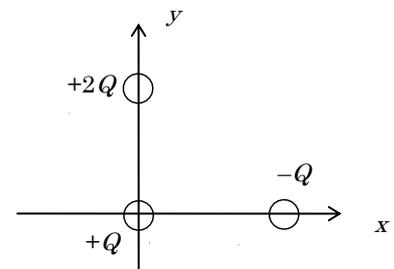
- 8) Est-il possible que le champ électrique (total) produit par les deux charges placées en  $X$  et en  $Y$  représentées sur le schéma ci-dessous soit nul en  $A$  ? en  $B$  ? en  $C$  ? en  $D$  ? en  $F$  ? en  $G$  ? en  $H$  ? en  $I$  ? Justifiez chacune de vos réponses.



## 8.3 Olympiades de physique

### Qualifications cinquième, 2003

Le schéma ci-contre montre un système d'axes  $x, y$ . Une charge électrique positive  $+Q$  est placée à l'origine des axes, une charge positive  $+2Q$  au point  $(0, a)$  et une charge négative charge  $-Q$  au point  $(a, 0)$ . Quel schéma ci-dessous représente au mieux la direction de la force agissant sur la charge placée à l'origine des axes (toutes les charges sont considérées comme ponctuelles) ?



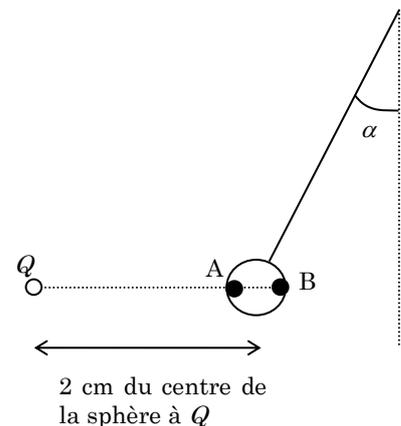
(R : d)

### Problème cinquième, 2003

Une petite sphère métallique de masse  $0,1\text{ g}$  et de rayon  $5\text{ mm}$  est suspendue à un fin fil de soie (de masse négligeable) de manière à constituer un pendule électrostatique. Ce type de dispositif est utilisé pour visualiser la présence de charges électriques à l'état statique.

Le pendule étant initialement électriquement neutre, il dévie de la verticale lorsqu'on en approche une charge électrique ponctuelle  $Q = +10\text{ nC}$ . On explique cette influence d'un objet chargé sur un autre qui est neutre par la polarisation de l'objet neutre. Ainsi, soumis à l'influence de  $Q$ , la région A de la sphère se charge négativement  $q_A = -4,5\text{ nC}$  tandis que la région B de la sphère se charge positivement  $q_B = +4,5\text{ nC}$ , la sphère restant neutre dans l'ensemble.

En supposant les régions A et B comme ponctuelles et diamétralement opposées, calculez l'angle d'inclinaison du pendule sur la verticale à l'équilibre ( $\alpha$ ).



$g = 10\text{ N/kg}$  ;  $k$  (constante de Coulomb) =  $9 \times 10^9\text{ N m}^2/\text{C}^2$ .

### Solution

Par application de la loi de Coulomb,  $F_{QA} = 1,8\text{ mN}$  et  $F_{QB} = 0,648\text{ mN}$ .

La valeur de la force résultante est donc  $1,152\text{ mN}$ .

$\text{tg } \alpha = 1,152 / 1$ , en conséquence de quoi  $\alpha = 49,04^\circ$ .

**Qualifications cinquième, 2004**

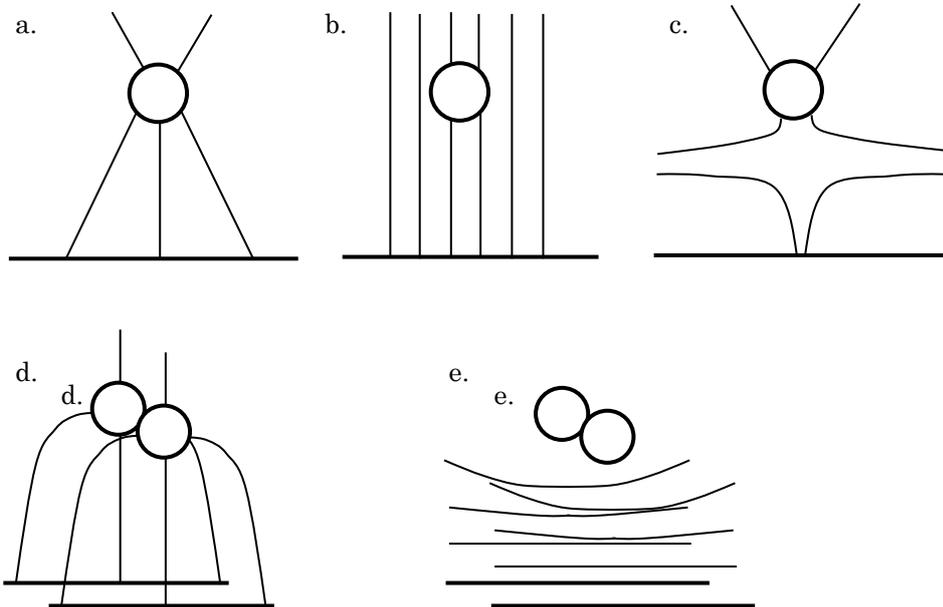
La force répulsive entre deux charges électriques ponctuelles vaut  $1 \mu\text{N}$  lorsque celles-ci sont distantes de 10 cm. Leur distante est réduite à 5 cm, la force qui s'exerce entre-elles est à présent :

- a. répulsive et quatre fois plus intense,
- b. répulsive et deux fois plus intense,
- c. attractive et de même intensité,
- d. attractive et quatre fois plus intense.

(R : a)

**Qualifications cinquième, 2005**

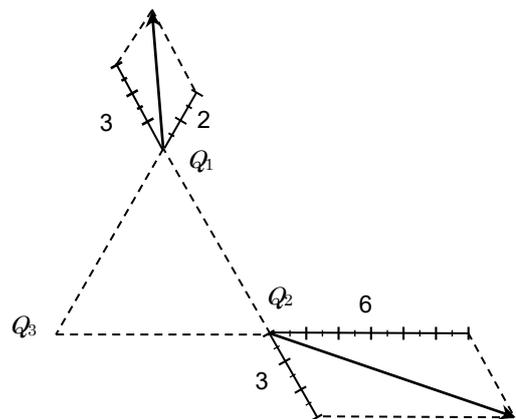
1) Une sphère chargée électriquement est suspendue au-dessus d'une plaque horizontale considérée comme infiniment grande et chargée de signe contraire à la sphère. Quel est le schéma, parmi les suivants, qui représente le mieux les lignes de champ électrique autour de ces deux objets ?



(R : d)

2) Trois charges électriques ponctuelles et immobiles,  $Q_1$ ,  $Q_2$  et  $Q_3$ , sont placées aux sommets d'un triangle équilatéral. Les forces indiquées sont les résultantes des interactions électriques sur  $Q_1$  et  $Q_2$  ; les nombres indiquent les valeurs des composantes. On donne  $Q_1 = +1$  (dans une unité arbitraire). Quelle(s) est (sont) la (ou les) affirmation(s) correcte(s) parmi les suivantes ?

- a.  $Q_2 = +3$  et  $Q_3 = +2$ .
- b.  $Q_2 = +3$  et  $Q_3 = -2$ .
- c.  $Q_2 = -3$  et  $Q_3 = +2$ .
- d.  $Q_2 = -3$  et  $Q_3 = -2$ .
- e.  $Q_2 = +3$  et la force résultante sur  $Q_3$  vaut environ 7.
- f.  $Q_3 = +2$  et la force résultante sur  $Q_3$  vaut environ 4,5.



(R : a et e)

**Qualifications cinquième, 2007**

Deux corps ponctuels électrisés sont fixés en deux points A et B séparés par une distance de 30 cm. Les charges électriques sont respectivement de  $+\mu\text{C}$  et  $+12\mu\text{C}$ . Existe-t-il un point M situé entre A et B où le champ électrique résultant créé par ces deux charges est nul ? Si oui, où est-il situé ?

- a)  $AM = 15 \text{ cm}$  b)  $AM = 12.5 \text{ cm}$  c)  $AM = 11.8 \text{ cm}$  d)  $AM = 0.2 \text{ m}$  e)  $BM = 9.7 \text{ cm}$  f) Impossible car les charges sont de même signe

(R : c)

### Challenge

- Quel est le rôle d'un paratonnerre ?
- Pourquoi y a-t-il des crépitements quand on enlève certains vêtements ?
- Qu'est-ce que la foudre ?
- Qu'est-ce qu'une cage de Faraday ?
- Pourquoi le noyau de l'atome n'éclate-t-il pas ?

# Electrocinétique

*En électrostatique, nous avons vu comment séparer des charges électriques, comment électriser des corps. Nous avons vu également les caractéristiques des forces électriques qui s'exercent entre ces particules chargées.*

*En électrocinétique, nous étudierons le mouvement des charges électriques dans les conducteurs et leurs effets.*

## 1. Savoirs

**A la fin de ce chapitre, vous devez avoir acquis les savoirs suivants**

- Être capable d'expliquer la notion d'intensité de courant.
- Comprendre et expliquer les notions de générateur de tension continue, de tension électromotrice et de résistance interne.
- Être capable d'expliquer le fonctionnement d'un moteur électrique et les notions de tension contre-électromotrice et de résistance interne.
- Énergie et puissance électriques.
- Conservation de l'énergie dans les circuits, lois de Kirchhoff.
- Savoir expliquer les associations de résistors en série et en parallèle.
- Comprendre et expliquer l'effet Joule.

## 2. Compétences

*Vous devez avoir acquis les compétences suivantes*

- Expliquer les phénomènes électrocinétiques en associant le courant à un flux de charges électriques et la différence de potentiel à une énergie par unité de charge.
- Réaliser un montage correspondant à un schéma électrique simple et inversement.
- Utiliser un multimètre.
- Définir et interpréter résistance interne, tensions électromotrice et contre-électromotrice.
- Calculer l'intensité du courant et la différence de potentiel entre deux points dans un circuit simple.
- Détecter un circuit ouvert ou un court-circuit dans un circuit électrique.
- Distinguer les branchements en série des branchements en parallèle.
- Lire et expliquer les caractéristiques d'un appareil électrique.
- Expliquer pourquoi le courant électrique peut causer des accidents (proximité de l'eau, mauvais fusibles, mauvaises connexions, court - circuits) et justifier les mesures de sécurité des appareils et installations électriques.
- Estimer notre consommation d'énergie électrique.

## 3. Notion de courant électrique

### 3.1 Déplacement momentané des charges électriques

Nous avons vu que la machine électrostatique permettait de produire des charges négatives sur une boule et des charges positives sur l'autre. Dès que cette accumulation est suffisante, un arc électrique apparaît entre les 2 sphères. (Fig. 23.01)

Cet arc n'est rien d'autre qu'un déplacement des charges électriques négatives (les électrons) de la sphère négative vers la sphère positive.

Ce déplacement ne dure qu'un moment et cesse dès que les 2 sphères sont redevenues neutres.

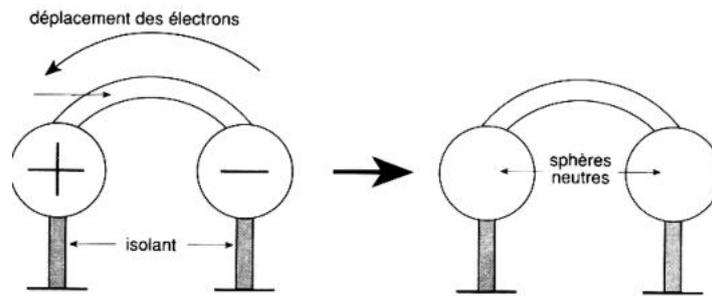


Figure 23.01

### 3.2 Analogie hydraulique

Comparons ce déplacement d'électrons avec le déplacement d'eau dans une conduite reliant deux réservoirs, l'un plein et l'autre presque vide. (Fig. 23.02)

Dès qu'on ouvre le robinet l'eau s'écoule jusqu'à ce que les 2 réservoirs aient le même niveau.

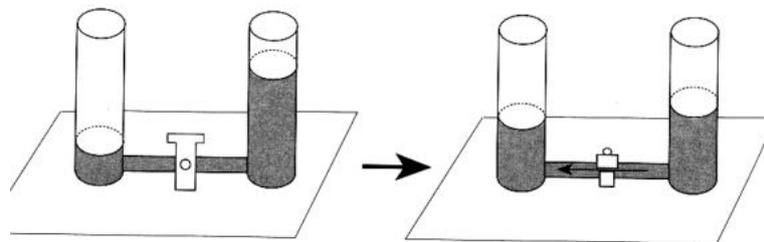


Figure 23.02

*Pour obtenir un écoulement permanent, il faut maintenir une différence de niveau dans les 2 réservoirs. Il faut pour cela les relier par l'intermédiaire d'une pompe assurant le retour de l'eau dans le réservoir de droite. (Fig. 23.03)*

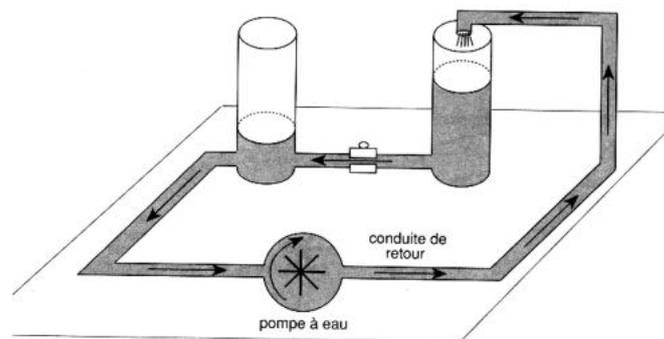


Figure 23.03

### 3.3 Déplacement permanent d'électrons

Pour obtenir un déplacement permanent d'électrons dans un conducteur, il faut relier ses 2 extrémités aux deux sphères sur lesquels on place en permanence des charges positives et des charges négatives.

Il faut donc disposer d'une pompe à électrons qui arrache des électrons à une sphère et qui les place sur l'autre. Ce sera le rôle du générateur (voir autre section)

Si l'air entre les 2 sphères est remplacé par un élément conducteur de charges électriques, les électrons vont circuler en permanence de la sphère - vers la sphère + : *on a un courant électrique*

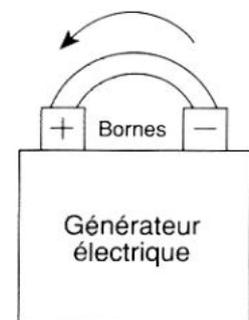


Figure 23.04

## 3.4 Le circuit électrique : générateur, conducteur, récepteur

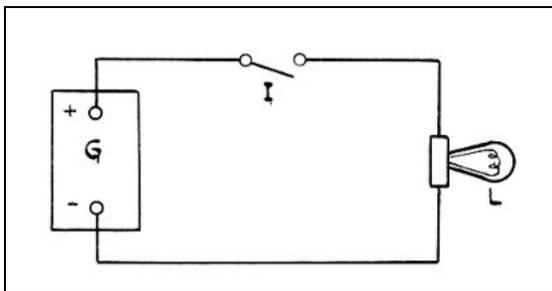


Figure 23.05

Un circuit électrique simple : une pile, des fils de cuivre, une ampoule et un interrupteur.

Selon la position de l'interrupteur, le circuit est :

Fermé : la lampe brille, le courant passe

Ouvert ; la lampe ne brille pas, le courant ne passe pas

*Dans le langage courant, « allumer une lampe » signifie fermer le circuit et donc l'interrupteur. Inversement, « éteindre la lampe » signifie ouvrir le circuit et donc l'interrupteur.*

### 3.4.1 Le générateur

Un générateur est un élément capable de fournir l'énergie électrique.  
Exemples : batterie, dynamo, pile.

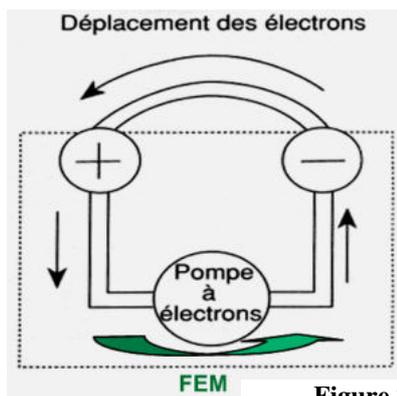


Figure 23.07

Tous les générateurs possèdent 2 bornes (+ et -).

Les symboles conventionnels utilisés pour représenter le générateur sont donnés à la figure 23.06.

Que représentent ces 2 bornes ?

*Le générateur (GN) est capable par l'intermédiaire d'une force interne (force électromotrice) d'arracher des électrons à une des bornes (qui deviendra +) et de les refouler sur l'autre borne (qui deviendra -).*

*On dit que c'est « une pompe à électrons » (Fig. 23.07)*

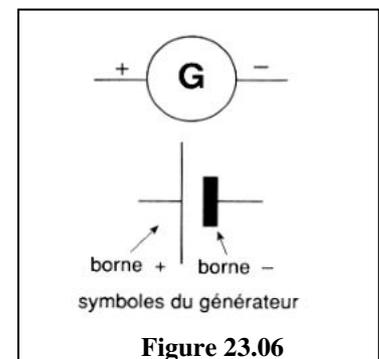


Figure 23.06

### Lecture : Les piles

L'exemple type de générateur de courant continu est la pile. Une pile est un ensemble de deux ou plusieurs éléments générateurs d'électricité en contact électrique.

La pile à colonne de Volta (pile voltaïque ou encore pile Volta) est la première pile électrique (Fig. 23.08). Elle a été inventée par Alessandro Volta et officialisée en 1800. La pile Volta est composée d'un empilement (d'où le nom de pile...) de petits disques de cuivre et de zinc alternés. Chaque disque de cuivre est séparé du disque de zinc sus-jacent par un bout de tissu imbibé de saumure (solution aqueuse de NaCl) alors que le disque de cuivre suivant est en contact direct avec le disque de zinc qu'il surplombe. De sorte que l'on a l'empilement: cuivre, saumure, zinc, cuivre, saumure, zinc, cuivre,... Il se produit au niveau de chaque couche une réaction d'oxydo-réduction. (Voir cours de Chimie). Il ne se passe rien au niveau du disque de cuivre. Les éléments participant à l'oxydation et la réduction sont les éléments zinc et eau. On peut d'ailleurs très facilement construire une pile en plongeant deux électrodes de cuivre et de zinc dans une solution de sulfate de cuivre. (Fig. 23.09).

Actuellement, on utilise des piles, dites sèches, qui ont des formes les plus diverses. (Fig. 23.10)



Figure 23.08

La pile de Volta à l'Institut royal.

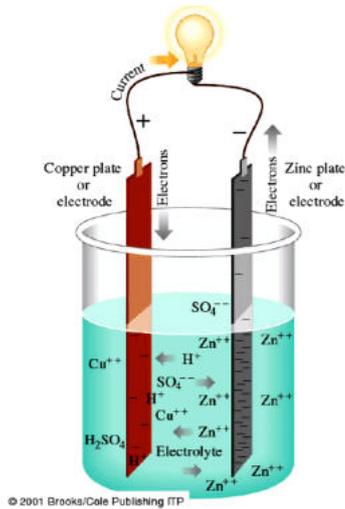


Figure 23.09

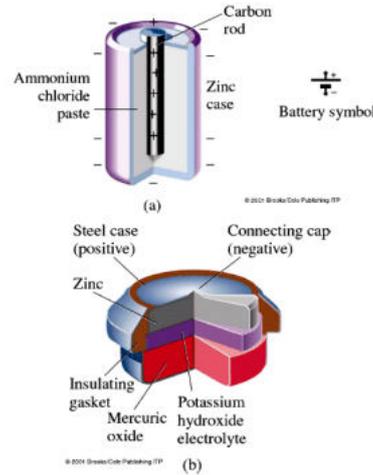


Figure 23.10

### 3.4.2 Différence de potentiel ou tension entre 2 points (symbole = U)

∅ Définition vue en 3G

Grandeur qui traduit la différence de concentration d'électrons entre les 2 points en question. Elle mesure la différence de niveau électrique entre les 2 bornes + et -

∅ Définition de 5G

*La différence de potentiel (d.d.p.) entre 2 points représente l'énergie à fournir pour amener une charge unitaire positive d'un point à l'autre ; c'est aussi l'énergie totale dissipée dans le circuit lors du passage d'une unité de charge dans ce circuit*

*La tension ou d.d.p (ou différence de potentiel) se symbolise par la lettre U. Elle se mesure en volt (symbole V)*

**Voltmètre** : appareil de mesure de la tension. Il se raccorde directement sur les 2 points dont on veut déterminer la d.d.p. (placement en parallèle).

### 3.4.3 Courant électrique

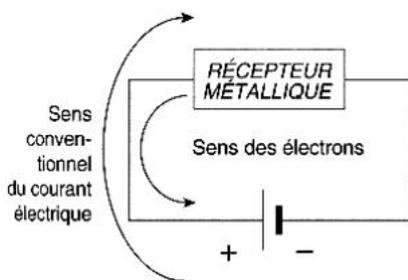


Figure 23.11

C'est le mouvement d'ensemble des électrons de la borne - vers la borne + du GN par l'extérieur de celui-ci.

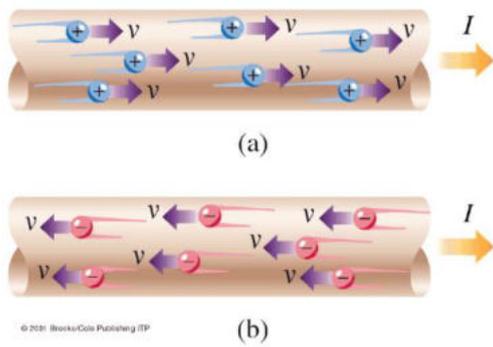
Remarque : Au début, on ne connaissait pas la nature du courant électrique, on en constatait seulement les effets.

**Par convention**, on a attribué un sens conventionnel au passage du courant électrique. (Fig. 23.11)

*Le sens conventionnel du courant électrique est le sens inverse du déplacement des électrons. Le sens conventionnel du courant électrique va donc du + vers le - par l'extérieur du générateur.*

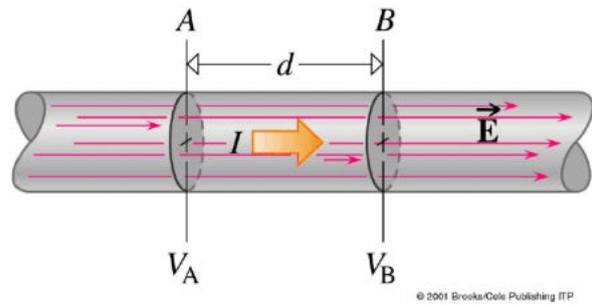
**Remarques importantes :**

- 1) Pour qu'un courant circule dans un circuit, il faut : qu'il existe une d.d.p. aux bornes du circuit et que le circuit soit fermé.
- 2) Figure 23.13 : Comme  $V_B < V_A$ , on parle dans le jargon des électriciens de **chute de tension**



**Figure 23.12**

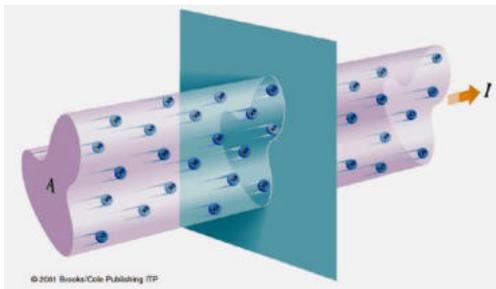
Le courant peut être vu comme le mouvement de charges positives (a) ou bien comme le mouvement de charges négatives (b)



**Figure 23.13**

Entre les points A et B, distants d'une longueur  $d$ , il y a une différence de potentiel  $V_B - V_A$ . Le sens du courant électrique correspond au mouvement de charges positives « virtuelle ». En réalité, ce sont les électrons négatifs qui se déplacent dans l'autre sens. Le sens du courant électrique indique aussi le sens du champ électrique  $E$ .

### 3.4.4 Intensité (symbole = $I$ ) :



**Figure : 23.14**

On caractérise l'écoulement d'un fleuve en un lieu par son débit c'est à dire par le volume d'eau qui traverse par seconde la section du fleuve en ce lieu.

Par analogie,

*L'intensité du courant électrique représente la quantité de charge électrique qui circule par seconde dans le circuit. C'est le débit avec lequel la charge traverse une surface. (Fig. 23.14)*



**André-Marie Ampère**, né à Lyon le 20 janvier 1775 et mort à Marseille le 10 juin 1836, est un mathématicien et physicien français. Il inventa le premier télégraphe électrique et, avec François Arago, l'électroaimant, et il énonça en 1827 la théorie de l'électromagnétisme. Son nom a été donné à l'unité internationale de courant électrique : l'ampère.

$$I = \frac{q}{t}$$

$I$  Intensité du courant, en A  
 $q$  Quantité d'électricité, en C  
 $t$  Temps, en s

*L'unité d'intensité de courant est l'ampère (A). C'est une unité fondamentale du système SI. A ce titre le coulomb est donc considéré comme unité dérivée. Le coulomb est la quantité d'électricité débitée par un courant d'intensité de un ampère pendant une seconde.*

$$q = I.t$$

$q$  Quantité d'électricité, en C  
 $I$  Intensité du courant, en A  
 $t$  Temps, en s

Cela implique également, qu'il nous faut une manière de définir l'ampère de façon rigoureuse. Cette définition sera donnée plus tard lorsque nous verrons la force électromagnétique.

#### Exemple

Un courant électrique de 1 A circule dans un fil. Combien d'électrons passent en un point donné en 1 s ?

**Solution**

La quantité d'électricité en C est de :  $Q = I.t = 1 \times 1 = 1 \text{ C}$ . Comme la charge de l'électron est de  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ,

le nombre d'électrons est alors de  $n_e = \frac{1}{1,6 \times 10^{-19}} = 6,3 \times 10^{23}$  électrons

La dernière formule nous permet d'introduire **l'unité pratique de charge électrique : l'ampère-**

**heure (Ah).** L'ampère-heure est la quantité d'électricité débitée par un courant de un ampère pendant une heure. Le lecteur démontrera que  $1 \text{ Ah} = 3600 \text{ C}$ .

Sur les batteries, on lit une valeur exprimée en *Ah*. C'est la capacité de la batterie c'est à dire la valeur de la charge totale que peut débiter la batterie à travers le circuit électrique.

Par exemple, l'indication 64 Ah signifie que la batterie peut débiter un courant d'une intensité de 64 A pendant 1 h, ou bien 32 A pendant 2 h, ou bien 16 A pendant 4 h.....

A titre indicatif, les piles à 1.5 V les plus utilisées, ont une capacité :

AAA : 1000 mAh ; AA : 2700 mAh ; etc....

Ces capacités dépendent fortement du type de piles (par ex. alcaline ou non) et de l'utilisation

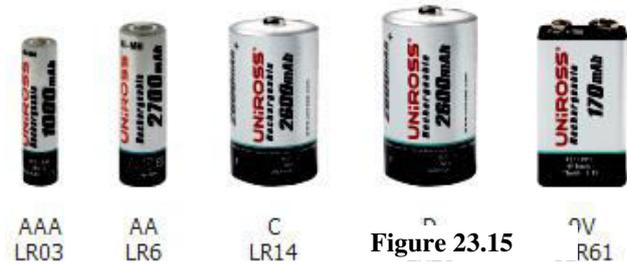


Figure 23.15

### Lecture : Les piles, petites mais dangereuses

Les piles semblent être un moyen inoffensif, économique et efficace pour obtenir de l'énergie. Mais sous cet aspect innocent se cache une menace écologique, capable de polluer gravement et pour de longues périodes le milieu naturel.

De nos jours, les piles sont devenues pratiquement indispensables mais leur utilisation démesurée crée des problèmes non négligeables. Il est temps de limiter leur utilisation dans la mesure du possible.

#### Gaspillage pour notre portefeuille :

Les piles peuvent être très puissantes et avoir une longue durée de vie, mais elles sont loin d'être une source d'énergie économique. Un calcul nous montre que le courant généré par une pile est en moyenne 36 fois plus cher que celui délivré par le réseau de distribution d'électricité. Si on utilise une pile alcaline, le kWh coûte en moyenne 6,2 e, contre 0,17 e proposé par le réseau ! Les piles ne sont pas si bon marché...

#### Gaspillage de ressources naturelles :

La fabrication des piles demande énormément d'énergie (50 à 150 fois plus que l'énergie qui sera restituée) et de matières premières non renouvelables (minerais...). Le procédé de fabrication peut également provoquer des pollutions.

#### Pollution :

C'est un problème grave. Les métaux lourds composants des piles (cadmium, manganèse, plomb, nickel, mercure...) sont fort polluants et très toxiques. Ces substances ont la capacité de s'accumuler dans la chaîne alimentaire. Libérés dans l'environnement, les métaux lourds se fixent dans les tissus organiques des êtres vivants. Une fois dans notre assiette et consommés, ils s'accumulent dans notre corps et, lorsque les concentrations deviennent importantes, peuvent provoquer des troubles neurologiques, des allergies, des troubles de la reproduction...

Actuellement, la tendance est à la diminution des quantités de métaux lourds utilisés et on trouve sur le marché des piles dites « vertes » sans mercure et cadmium ajoutés. Mais attention, les piles en contiennent toujours. Ces éléments sont associés à d'autres métaux sous forme d'alliages. Par exemple, la teneur résiduelle en mercure dans les piles alcalines a été réduite de 0,10% à 0,025% sans être pour autant complètement éliminée.

La pile à mercure a été interdite en 2000 par un Arrêté Royal et on ne trouve pratiquement plus de piles boutons au mercure sur le marché belge, remplacées majoritairement par des piles à oxyde d'argent.

Malgré ces mesures, les piles restent des déchets dangereux, réfléchissez-y avant de jeter vos piles à la poubelle !

**Conclusion : utilisez des piles rechargeables**

### 3.4.5 Vitesse des électrons dans un conducteur

La vitesse des électrons dans un conducteur est très faible. De l'ordre de 0.1 à 1 mm/s. En effet, les électrons en mouvement subit de nombreuses collisions freinent sa progression. Ils se déplacent en réalité en zigzag. (Fig. 23.16)

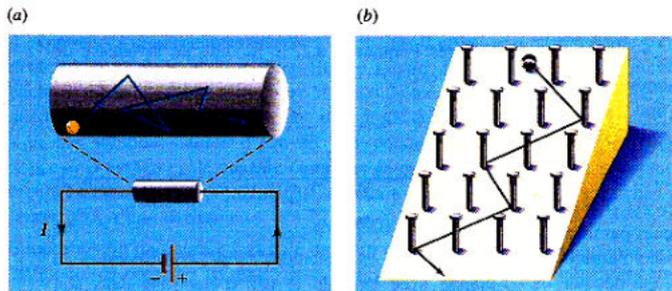


Figure 23.16

**Figure 6.6** ◀  
 (a) Les électrons de conduction dans un métal entrent en collision avec les ions positifs du cristal et suivent des trajectoires en zigzag. Lorsqu'on relie une pile, les électrons ont légèrement tendance à se déplacer dans le sens opposé au sens conventionnel du courant. (b) Le mouvement des électrons est analogue à celui d'une bille d'acier roulant vers la base d'un plan incliné planté de clous.

Comment expliquer alors que le téléphone peut transmettre des signaux électriques à une vitesse proche de la vitesse de la lumière ? La situation est analogue à un long tuyau d'eau. Certaines molécules sont poussées à l'entrée et d'autres molécules jaillissent de l'autre extrémité. Une perturbation se propage rapidement dans l'eau le long du tuyau, bien qu'un petit volume du liquide se déplace très peu. Dans le cas du fil électrique, c'est le champ électrique qui se propage à une vitesse proche de celle de la lumière, transportant le signal et l'énergie et forçant les électrons à se mettre en mouvement à l'endroit qu'il atteint.

## 4. Rappels des lois fondamentales d'électricité

### 4.1 Loi d'Ohm

*Pour un conducteur donné, la résistance est le rapport entre la différence de potentiel  $U$  à ses bornes et l'intensité  $I$  du courant qui le traverse :*

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

$U$	Différence de potentiel, en V
$I$	Intensité du courant, en A
$R$	Résistance, en $\Omega$

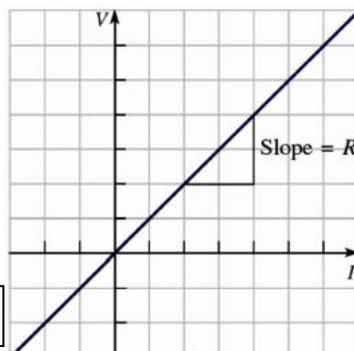


Figure 24.01



**Georg Simon Ohm**, né le 16 mars 1789 à Erlangen Allemagne et mort âgé de 65 ans le 6 juillet 1854 à Munich, était un physicien allemand ayant étudié à l'université d'Erlangen.

*La résistance d'un conducteur est de 1 ohm ( $\Omega$ ) lorsque soumis à une différence de potentiel de 1 volt, il est parcouru par un courant d'une intensité de 1 ampère (A).*

Plus la résistance d'un conducteur est élevée, plus il s'opposera au passage du courant et plus l'intensité qui le traverse sera faible pour une tension donnée. (Fig. 24.01)

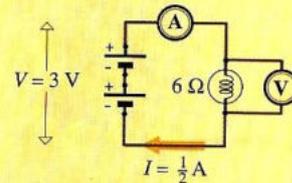
**Exemple**

**Exemple 19.5** Une petite ampoule ohmique est placée en série avec deux piles de 1,5 V chacune, comme dans la Fig. 19.18. L'ampèremètre, en série avec l'ampoule, indique une intensité de courant de 0,50 A, sans introduire une chute appréciable de tension entre ses bornes. Le voltmètre, branché aux bornes de l'ampoule, indique une tension de 3,0 V, sans introduire un changement appréciable dans l'intensité du courant dans l'ampoule. Quelle est la résistance de l'ampoule ?

**Solution :** [Données :  $V = 3,0 \text{ V}$  et  $I = 0,50 \text{ A}$ . À trouver :  $R$ ]. Notons que la tension aux bornes de l'ampoule est la tension totale produite par les deux piles,  $1,5 \text{ V} + 1,5 \text{ V}$ . De la loi d'Ohm, nous déduisons :

$$R = \frac{V}{I} = \frac{3,0 \text{ V}}{0,50 \text{ A}} = \boxed{6,0 \Omega}$$

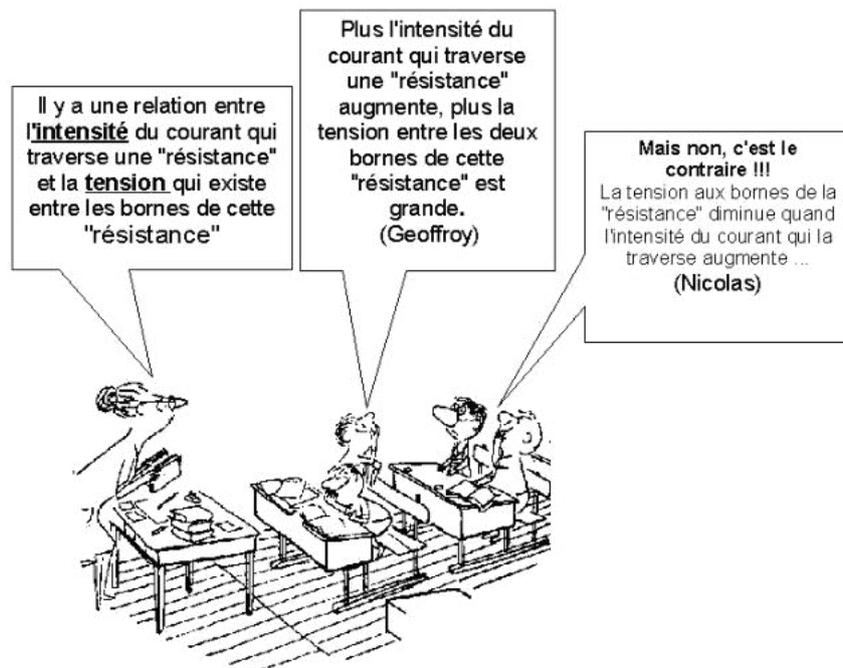
► **Vérification rapide :**  $V = IR = (0,50 \text{ A})(6,0 \Omega) = 3,0 \text{ V}$ . La faible résistance attire un courant important même sous une faible tension.



**Figure 19.18** Un circuit formé par deux piles de 1,5 V et une lampe en série. L'ampèremètre  $\text{A}$  est branché en série dans le circuit, où on veut mesurer l'intensité, et le voltmètre  $\text{V}$  est branché en parallèle, entre les deux points dont on veut déterminer la différence de potentiel.

**Important :** Dans l'exemple ci-dessus, regardez bien et retenez comment sont branchés le voltmètre et l'ampèremètre.

**Ampèremètre :** appareil de mesure de l'intensité. Il doit être traversé par le courant du circuit, on dit qu'il se place en série dans le circuit.



*Qui a raison ? Geoffroy ou Nicolas ?*

## 4.2 Puissance P

### Expériences

Prenons des ampoules de différentes puissances  $P$ . Appliquons une tension  $U$  et mesurons  $I$  lorsqu'elles fonctionnent normalement. Faisons un tableau  $U, I, P$ , et nous remarquerons que pour chaque ampoule le produit  $U.I$  est quasiment égal à la puissance  $P$ .

*Le produit de la tension  $U$  par l'intensité  $I$  du courant définit la puissance  $P$  de l'appareil.*

$$P = U.I$$

$P$	Puissance, en W
$U$	Tension, en V
$I$	Intensité du courant, en A

*Comme  $U$  est l'énergie par unité de charge, comme  $I$  est la charge qui passe par seconde dans le circuit, la puissance  $P$  est donc bien l'énergie dépensée par seconde dans ce circuit.*

### Exemple

Une pile de tension 12 V débite dans un circuit un courant continu de 5,0 A. Quelle est la puissance fournie par la pile ?

#### Solution

Il suffit d'appliquer la formule :  $P = U.I = 12 \times 5.0 = 60 \text{ W}$

## 4.3 Energie E

Le montant de la facture d'électricité dépend de l'énergie électrique consommée par l'ensemble des appareils électriques utilisés. Une lampe qui fonctionne deux heures coûte deux fois plus chère que si elle ne brille que 1 heure car elle consomme deux fois plus d'énergie. De plus une lampe de 100 W consommera plus d'énergie qu'une de 40 W.

*L'énergie électrique  $E$  consommée par un appareil est proportionnelle à sa puissance  $P$  et à son temps de fonctionnement  $t$*

$$E = P.t$$

$E$	Energie, en J
$P$	Puissance, en W
$t$	Temps, en s

*Le watt étant une unité relativement petite, on préfère utiliser le kilowatt ( $kW = 1000 \text{ W}$ ) pour mesurer la puissance  $P$  et l'heure (h) pour mesurer le temps. Alors, l'énergie ( $E$ ) s'exprime en kWh*

### Exemple

Une lampe de 1000W qui fonctionne durant 1 heure consomme 1 kWh d'énergie

### Challenge

Que vaut un kilowattheure (kWh) en joule (J) ?

## 5. Loi de Pouillet. Détermination des résistances.

Considérons un conducteur cylindrique, par exemple un fil. La résistance du fil dépend de la nature du matériau dont il est fait et de sa géométrie. L'analogie avec de l'eau coulant dans un tuyau suggère que la résistance est proportionnelle à la longueur du tuyau, car plus le fil est long et plus le nombre de collisions que subit un porteur de charge est grand. De même, plus le tuyau est étroit et plus la résistance est grande. Nous pouvons donc prévoir que la résistance est inversement proportionnelle à la section. En final :

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

$R$  Résistance, en  $\Omega$   
 $\rho$  Résistivité, en  $\Omega.m$   
 $L$  Longueur, en m  
 $S$  Section, en  $m^2$

**La résistivité,  $\rho$ , est une constante qui dépend principalement de la nature du matériau** (La résistivité varie aussi en fonction de la température). Les matériaux, dont la résistivité est inférieure à  $10^{-5} \Omega.m$  sont dits conducteurs (par ex : l'argent et le cuivre). Les matériaux dont la résistivité est plus grande  $10^5 \Omega.m$  sont dits isolants. (Par ex. le verre, le téflon, le caoutchouc). Le tableau donne la résistivité de quelques matériaux.

**TABLEAU 19.2 Résistivités**

Substance	Résistivité ( $\rho$ ) (en $\Omega.m$ )
Aluminium	$2,8 \times 10^{-8}$
Laiton	$\approx 8 \times 10^{-8}$
Constantan (60 % Cu, 40 % Ni)	$\approx 44 \times 10^{-8}$
Cuivre	$1,7 \times 10^{-8}$
Fer	$\approx 10 \times 10^{-8}$
Manganin ( $\approx 84$ % Cu, $\approx 12$ % Mn, $\approx 4$ % Ni)	$\approx 44 \times 10^{-8}$
Mercure	$96 \times 10^{-8}$
Nichrome ( $\approx 59$ % Ni, $\approx 23$ % Cu, $\approx 16$ % Cr)	$100 \times 10^{-8}$
Platine	$10 \times 10^{-8}$
Argent	$1,6 \times 10^{-8}$
Tungstène	$5,5 \times 10^{-8}$
Carbone	$3,5 \times 10^{-5}$
Germanium	0,46
Silicium	100-1000
Verre	$10^{10}$ - $10^{14}$
Néoprène	$10^9$
Polyéthylène	$10^8$ - $10^9$
Polystyrène	$10^7$ - $10^{11}$
Porcelaine	$10^{10}$ - $10^{12}$
Téflon	$10^{14}$
Chlorure de sodium (solution saturée)	0,044
Sang	1,5
Matières grasses	25

\* Valeurs déterminées aux alentours de 20°C.

### Exemple

Emilie veut alimenter sa cabane qui se trouve au bout du jardin. Entre le compteur et cette cabane la distance est de 80 m. Quelle sera la résistance électrique du fil électrique en cuivre si celui-ci a pour section  $1.5 \text{ mm}^2$  ?

#### Solution

Attention : La longueur du fil est de  $2 \times 80 = 160$  m car il y a deux fils (un aller et un retour)

La résistivité du cuivre est d'après le tableau 19.2 de :  $\rho = 1.7 \times 10^{-8} \Omega.m$

$$\text{La résistance est donc : } R = \frac{\rho L}{S} = \frac{1.7 \times 10^{-8} \times 160}{1.5 \times 10^{-6}} = 1.8 \Omega$$

### Exemple

On veut utiliser un ruban de nichrome de section rectangulaire  $0.25 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$  comme élément chauffant d'un grille-pain. Quelle doit être sa longueur pour que sa résistance soit de  $1.5 \Omega$  à la température ambiante ?

#### Solution

$$\text{La section est : } S = 0.25 \times 10^{-3} \times 1.0 \times 10^{-3} = 0.25 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

La résistivité du nichrome est d'après le tableau 19.2 :  $\rho = 100 \times 10^{-8} \Omega.m$

$$\text{La longueur est donc : } L = \frac{RS}{\rho} = \frac{1.5 \times 0.25 \times 10^{-6}}{100 \times 10^{-8}} = 0.38 \text{ m}$$



**Claude Servais Mathias Marie Roland Pouillet**, né à Cusance (Doubs) le février 1790 et mort à aris le 14 juin 1868, est un physicien français.

## Lecture : Les fils électriques

En pratique, les sections des fils électriques en cuivre sont standardisées. Le tableau donne quelques valeurs. La tension du courant est de 220 V, sauf pour les plaques de cuisson en triphasé où la tension est de 380-400 V

Le nombre d'utilisation indique le nombre maximum de connections sur le circuit. Par exemple, on ne peut avoir plus de 8 prises sur un même circuit. De même, machine à laver la vaisselle, séchoir, etc. doivent être sur des circuits séparés.

**Informations sur: Section des fils électriques**

La section définit la grosseur de votre fil électrique et donc l'intensité du courant électrique que le fil pourra supporter. Voici un tableau qui vous donnera quelques indications utiles en fonction du matériel installé :

Type	Section	Nombre d'utilisation	Fusible associé
Eclairage	1,5 mm <sup>2</sup>	8	10 A
VMC	1,5 mm <sup>2</sup>	1	2A
Prise de courant 16A	2,5mm <sup>2</sup>	8	16A
Plaque de cuisson en triphasé	2,5mm <sup>2</sup>	1	16A
Plaque de cuisson en monophasé	6mm <sup>2</sup>	1	32A

## 6 L'effet Joule – loi de joule

### 6.1 L'effet joule

#### 6.1.1 Expérience

Les expériences montrent que le fait d'envoyer du courant dans un conducteur provoque un échauffement plus ou moins important dans celui-ci.

L'effet Joule est le dégagement de chaleur qui se produit dans un conducteur lorsqu'il est parcouru par un courant électrique.

La quantité de chaleur dégagée est exprimée en joules et notée  $Q$ . Comme cette chaleur n'est rien d'autre que de l'énergie on la note aussi  $E$ .

La figure 26.01 donne une analogie mécanique de l'effet joule. (Note : dans la légende lire « source de tension » ou lieu de « source de f.é.m. »)

#### 6.1.2 Remarques

1) Le joule (J) représente la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température de 0,24 gramme d'eau. Il faut donc 4,18 J pour élever de 1°C la température de 1 gramme d'eau. Cette quantité de chaleur correspond à la calorie qui est une unité abandonnée.

On voit donc que 1 cal. = 4,18 J

2) Notons aussi que la combustion complète de

- 1 kg de charbon libère environ 33.000.000 J
- 1m<sup>3</sup> de gaz naturel libère environ 35.000.000 J
- 1 litre de gasoil de chauffage libère environ 38.000.000 J

3) Notons également que le kWh est équivalent à 3.600.000 J

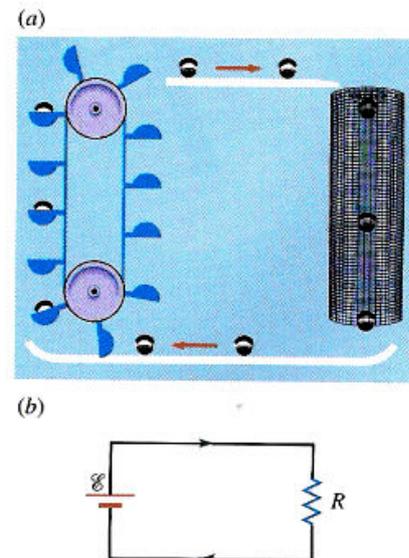


Figure 7.1 ▲

(a) Un analogue mécanique d'un circuit électrique. Un dispositif mécanique fournit l'énergie servant à soulever les billes à une certaine hauteur. Elles tombent ensuite à vitesse constante dans un tube encombré de fils métalliques, leur énergie potentielle gravitationnelle étant convertie en énergie thermique. (b) Dans un circuit électrique, une source de f.é.m. élève l'énergie potentielle électrique des charges. Cette énergie est dissipée sous forme d'énergie thermique dans la résistance.

Figure 26.01

## 6.2 Conclusion

*Lors de l'effet Joule, le dégagement de chaleur est proportionnel*

- à la résistance électrique  $R$  du conducteur
- au carré de l'intensité  $I$  du courant
- au temps  $t$  de passage du courant dans le conducteur

*L'énergie électrique qui est transformée en chaleur est donnée par la formule*

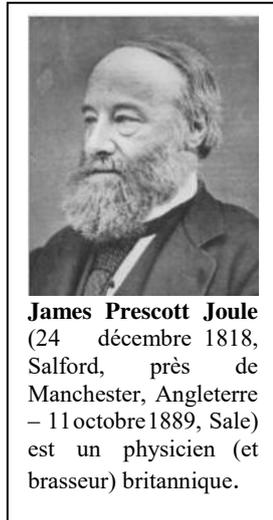
$$E = R.I^2.t$$

$E$	Energie dissipée, en J
$R$	Résistance, en $\Omega$
$I$	Intensité du courant, en A
$t$	Temps, en s

Puisque la loi d'Ohm nous dit que  $U = R.I$ , on a aussi :

$$E = U.I.t$$

$E$	Energie dissipée, en J
$U$	Tension, en V
$I$	Intensité du courant, en A
$t$	Temps, en s

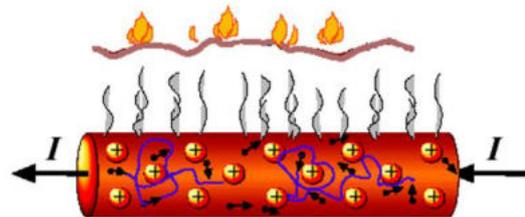


## 6.3 Cause de l'effet joule

L'énergie thermique produite par le passage du courant est due aux chocs des électrons contre les atomes du conducteur lors de leur mouvement d'ensemble à travers le conducteur. (Fig. 26.02)

Ils sont freinés par les atomes. Ils perdent lors de chaque collision avec les atomes un peu de leur énergie. Ils communiquent donc au cours de ces très nombreux chocs de l'énergie aux atomes. Ceux-ci s'agitent de plus en plus ce qui entraîne une augmentation de la température du conducteur.

Fig. : 26.02



## 6.4 Applications de l'effet joule

### Inconvénients

#### *Echauffement des fils et bobinages.*

Un conducteur parcouru par du courant électrique s'échauffe. La température s'élève au-dessus de celle du milieu ambiant. De la chaleur va se dissiper dans l'espace environnant.

Lorsque la chaleur dégagée dans le fil et la chaleur dissipée s'équilibrent, le conducteur atteint sa température de régime (après un temps plus ou moins long). S'il circule un courant plus important dans le conducteur (ou bobinage), la température va à nouveau augmenter pour atteindre une nouvelle température plus élevée.

En fait, la puissance des machines électriques est limitée par la température maxima que pourra supporter le bobinage en fonctionnement. Il faudra donc limiter la densité de courant dans le conducteur.

Pratiquement on admet une élévation de température d'une cinquantaine de degrés au-dessus de la température ambiante. Pour permettre une augmentation de la puissance des machines sans augmenter les dimensions, on les munit de ventilateurs qui dissipent plus de chaleur.

### Mauvais contact et courts-circuits

Les mauvais contacts (serrage insuffisant des connexions électriques) produisent des résistances de contact. Lors du passage du courant, il y a dégagement de chaleur qui échauffe la jonction mal assurée (Boîtes de dérivation, interrupteurs, prises,...)

Il y a court-circuit lorsqu'une d.d.p. existe entre deux conducteurs réunis par une très faible résistance.

Lors d'un court-circuit dans une installation électrique, l'intensité du courant devient excessive. La chaleur dégagée par effet joule pour porter le fil au rouge et produire éventuellement un incendie. Il faut donc prévoir un point faible dans la ligne à un endroit que l'on connaît et protégé, afin de préserver l'installation.

C'est le fusible ou disjoncteur.

### Exemple

Intensité dans la ligne lors du bon fonctionnement de la lampe :  $I = \frac{P}{U} = \frac{40W}{220V} = 0.18 \text{ A}$

En cas de court-circuit éventuel sur l'installation, supposons que la résistance du court-circuit tombe à 0.1  $\Omega$ . L'intensité dans la ligne devient :  $I = \frac{U}{R} = \frac{220V}{0.1\Omega} = 2200 \text{ A}$ .

Une telle intensité va dégager un énorme dégagement de chaleur ( $W = RI^2$ ) susceptible d'enflammer les matières combustibles. C'est le fusible et le disjoncteur qui protégeront par coupure du circuit.

### Applications

#### La chaleur dégagée peut utile

Appareil de chauffage électrique

Fer à repasser

Thermoplongeur

Chauffe-eau

Allume-cigare

Cuisinière

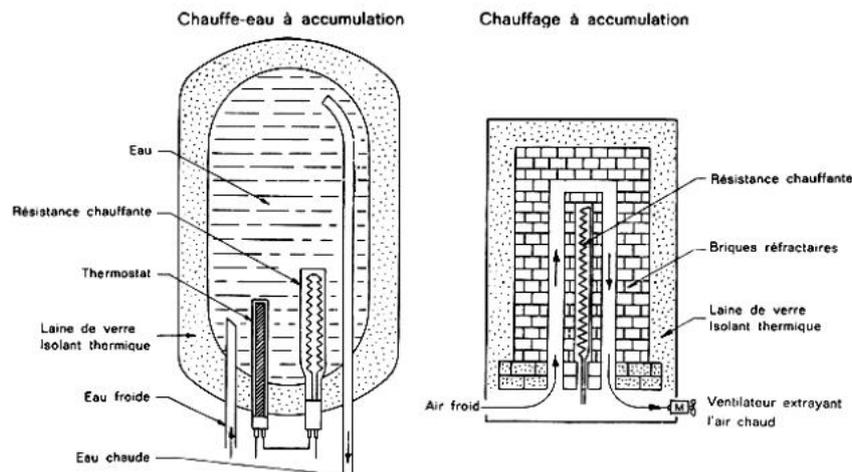
Bouilloire

Radiateur

Gaufrier

Grille-pain

Coussin chauffant



Figures 26.03 et 26.04

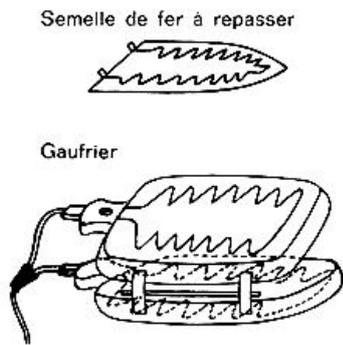


Figure 26.05



Figure 26.06

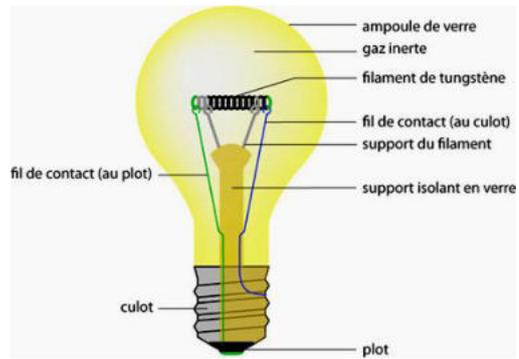


Figure 26.07

### Eclairage électrique par incandescence

Filament de tungstène dans le vide porté à haute température (2500°C) (Fig. 26.07)

### Coupe-circuit à fusibles contre les surintensités

Un fil fin (alliage : 66% Pb et 34% Sn, Ag, Al,...) tendu entre deux broches placé dans la ligne à protéger, n'atteint sa température de fusion que si l'intensité du courant dépasse la valeur pour laquelle il est calibré. (Fig. 26.08)

Lorsque ce fil fond, on peut être tenté de relier les deux broches par un quelconque fil conducteur. Cela s'appelle « ponter » un fusible.

**Il ne faut jamais « ponter » un fusible. Il faut toujours le remplacer par un neuf calibré pour la même intensité. Au préalable, il faut rechercher la cause du défaut et le faire disparaître.**

L'intensité nominale du fusible est l'intensité normale de fonctionnement.

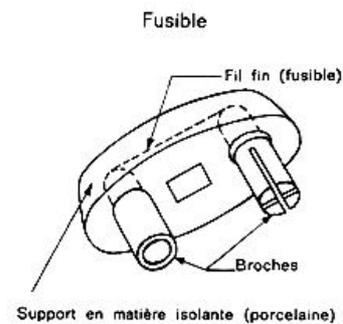
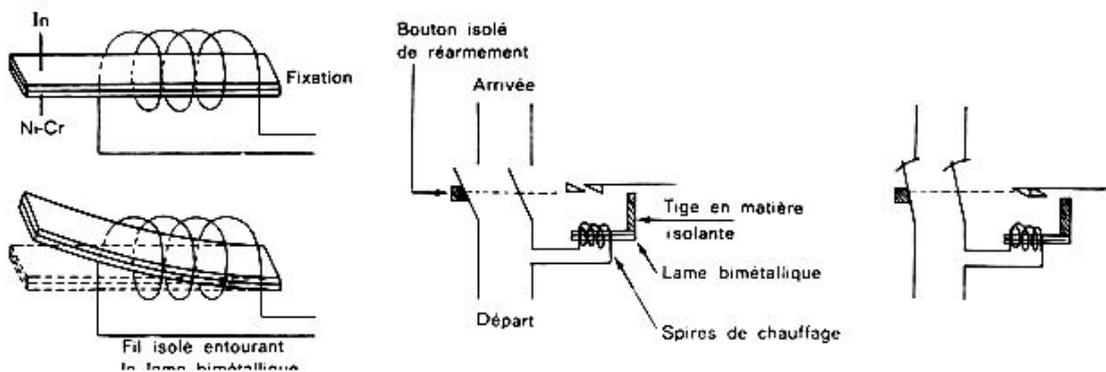


Figure 26.08

### Disjoncteur (Figure 26.09)

Disjoncteur



Parfois la protection du circuit électrique est assurée par un disjoncteur. C'est un interrupteur qui ouvre automatiquement le circuit lors d'une surintensité.

Une lame bimétallique est constituée de métaux différents se dilatant différemment tels qu'une lamelle en invar (allongement nul en fonction de la température) et une autre en nickel-chrome (allongement important soudées). Lors du passage du courant dans quelques spires de chauffage, la lame en Ni Cr s'allonge et l'ensemble se courbe du côté de l'invar. Si l'intensité devient excessive, la déformation agit mécaniquement sur le « maintien » de l'interrupteur provoquant l'ouverture du circuit. Un bouton de « réarmement » permet de réenclencher le disjoncteur lorsque le défaut a disparu (surcharge du circuit).

Dans certains disjoncteurs, il n'y a pas de spires de chauffage. Le courant circule directement dans les lamelles et fait agir le bilame.

Le fournisseur d'énergie électrique installe un disjoncteur à maximum d'intensité près du compteur de chaque client.

### Exemple

Une résistance de  $10 \Omega$  est alimentée par une pile de tension  $12 \text{ V}$ .

- Quelle est l'intensité du courant qui passe à travers la résistance ?
- Quelle est la puissance dissipée par la résistance ?
- Quelle est la quantité d'énergie dissipée en 1h30.

### Solution

- On applique la loi d'Ohm :  $I = \frac{U}{R} = \frac{12}{10} = 1.2 \text{ A}$
- La puissance dissipée est donnée par :  $P = U.I = 12 \times 1.2 = 14.4 \text{ W}$
- Appliquons la loi de Joule :  $E = RI^2t = 10 \times 1.2^2 \times 1.5 \times 3600 = 77760 \text{ J}$

### Exemple

L'élément chauffant d'un radiateur consomme une puissance de  $1000 \text{ W}$  lorsqu'il fonctionne à  $120 \text{ V}$ .

- Quelle est l'intensité du courant qui le traverse dans les conditions normales ?
- Quelle puissance consommerait-il si la différence de potentiel diminuait à  $110 \text{ V}$  ?

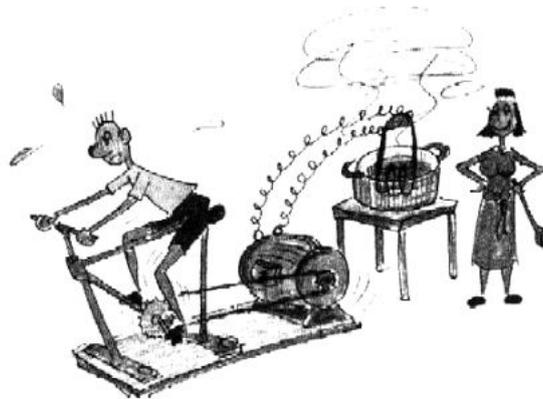
### Solution

- L'intensité du courant est de :  $I = \frac{P}{U} = \frac{1000}{120} = 8.3 \text{ A}$
- Nous devons d'abord calculer la résistance de l'élément :

$$\left. \begin{array}{l} P = U.I \\ U = RI \end{array} \right\} \rightarrow P = \frac{U^2}{R} \rightarrow R = \frac{U^2}{P} = \frac{120^2}{1000} = 14.4 \Omega$$

Puisque nous supposons que l'élément obéit à la loi d'Ohm, sa résistance ne va pas changer dans les nouvelles conditions de fonctionnement. Par conséquent, la nouvelle puissance consommée est :

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{110^2}{14.4} = 840 \text{ W}$$



## 7 Associations de résistances en série

### Notes préliminaires

1) Une **résistance** est un composant électronique ou électrique dont la principale caractéristique est d'opposer une plus ou moins grande résistance (mesurée en ohms) à la circulation du courant électrique.

C'est par métonymie que le mot « résistance », qui désigne avant tout une propriété physique, en est venu à désigner aussi un type de composant que certains préfèrent appeler un « dipôle résistant ». On a parfois suggéré, pour l'enseignement de la physique, notamment dans les petites classes, d'utiliser le terme « résisteur » ou l'anglicisme « **résistor** » (du mot resistor qui, en anglais, désigne ce type de composant), ou encore l'expression « conducteur ohmique ».

Dans la suite du cours, nous utiliserons indifféremment résistance et résistor

2) Les symboles pour représenter une résistance dans un circuit est soit un petit rectangle (Fig. 27.01) soit la ligne brisée (Fig. 27.02)



**Figure 27.01:** Symbole « rectangle » de la résistance, principalement utilisé dans les pays européens



**Figure 27.02 :** Symbole « ligne brisée » de la résistance, principalement utilisée dans les pays anglo-saxons.

*Par convention, une ligne continue sur un schéma électrique a une résistance nulle. Autrement dit, le potentiel est le même en TOUT point d'une ligne continue.*

### 7.1 Définition

*Des résistances sont placées en série, lorsqu'elles sont placées bout à bout. (La sortie de la 1 est connectée à l'entrée de la 2, la sortie de la 2 est connectée avec l'entrée de la 3, etc.). Autrement dit, le courant qui passe dans l'une passe dans l'autre. (Fig. 27.03)*

Soient deux récepteurs de résistance  $R_1$  et  $R_2$  groupés en série, soient  $U_1$  et  $U_2$  la différence de potentiel aux bornes des récepteurs, soit  $I$  l'intensité du courant dans le circuit et soit enfin  $U$  la différence de potentiel aux bornes du groupement.

Puisque :  $U_1 = R_1 I$  et  $U_2 = R_2 I$  Et que :  $U = U_1 + U_2$

Alors :  $U = R_1 I + R_2 I = (R_1 + R_2) I = R_T I$

$R_T$  est la résistance totale du circuit. C'est la résistance équivalente aux résistances  $R_1$  et  $R_2$

En conclusion :

$$R_T = R_1 + R_2$$

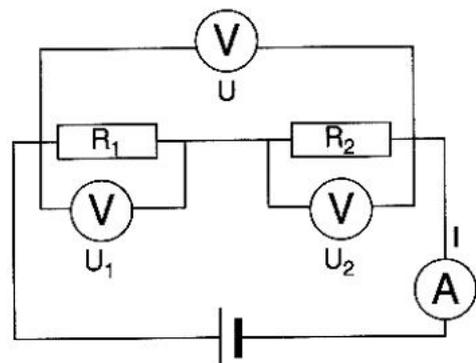
*La résistance d'un groupement en série est égale à la somme des résistances de chaque récepteur.*

Généralisation pour  $n$  résistances :

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots + R_n$$

En conséquence, lorsqu'on introduit une résistance supplémentaire en série dans un circuit, la différence de potentiel étant maintenue constante, l'intensité du courant diminue. En corollaire, on

Figure 27.03

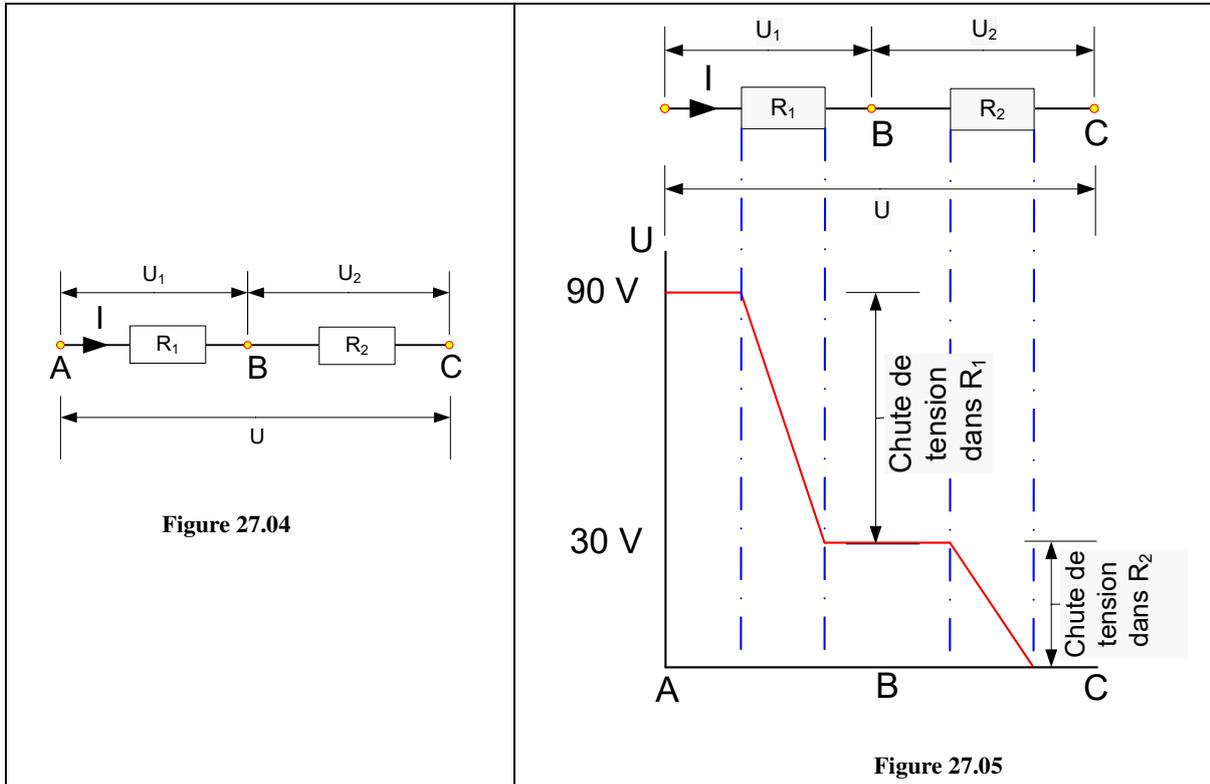


**retiendra que, pour des résistances en série, la résistance totale est obligatoirement plus grande que la plus grande des résistances.**

On comprend ainsi que la résistance interne d'un ampèremètre, toujours placé en série avec le récepteur, doit être aussi petite que possible.

### Exemple

La figure 27.04 montre deux résistances en série. Si  $R_1 = 10\Omega$ ,  $R_2 = 5\Omega$  et  $U = 90\text{ V}$ , quelle est l'intensité du courant  $I$  et quelles sont les tensions  $U_1$  et  $U_2$ ?



### Solution

Calculons d'abord la résistance totale :  $R_t = R_1 + R_2 = 10 + 5 = 15\Omega$

Pour déterminer  $I$ , appliquons la loi d'Ohm :  $I = \frac{U}{R} = \frac{90}{15} = 6\text{ A}$

Calculons les tensions :  $U_1 = R_1 I = 10 \times 6 = 60\text{ V}$  et  $U_2 = R_2 I = 5 \times 6 = 30\text{ V}$

Nous vérifions que :  $U = U_1 + U_2 = 60 + 30 = 90\text{ V}$

Si nous fixons arbitrairement la tension en C à zéro, la figure 27.05 montre l'évolution des tensions de A à C

## 8 Association de résistances en parallèle

### 8.1 Définition

Les résistances sont placées en parallèle lorsque leurs bornes d'entrée sont connectées entre elles et lorsque leurs bornes de sorties sont également connectées entre elles. Par conséquent, des résistances en parallèle ont la même tension à l'entrée et également la même tension à la sortie (La tension de sortie étant évidemment plus basse que la tension d'entrée)

La figure 28.01 montre deux résistances  $R_1$  et  $R_2$  mises en parallèle. Nous insérons trois ampèremètres dans le circuit

- $A_1$  et  $A_2$  mesurent l'intensité du courant ( $I_1$  et  $I_2$ ) dans chaque récepteur (dérivations ou circuits dérivés)
- $A$  mesure l'intensité du courant  $I$  débité par le générateur (circuit principal).

Nous constatons que l'intensité du courant dans le circuit principal est égale à la somme des intensités des courants dans les circuits dérivés.

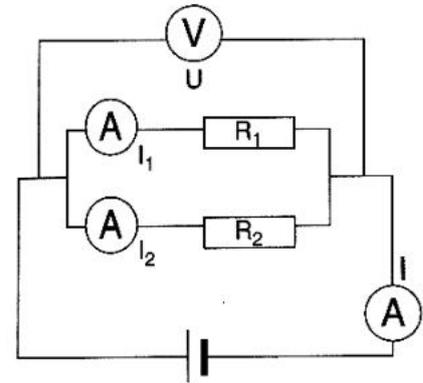


Figure 28.01

### Loi des intensités

L'intensité du courant électrique dans le circuit principal est égale à la somme des intensités des courants dérivés :

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$

Appliquons maintenant cette loi au schéma de la figure 28.01 :

Nous avons donc :  $I = I_1 + I_2$  or la loi d'Ohm permet d'écrire  $I_1 = \frac{U}{R_1}$ ,  $I_2 = \frac{U}{R_2}$  et  $I = \frac{U}{R_T}$

$$\text{Donc : } \frac{U}{R_T} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} \rightarrow \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Nous retiendrons :

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Pour  $n$  résistances, nous aurons :

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

L'inverse de la résistance d'un groupement en parallèle est égal à la somme des inverses des résistances des circuits dérivés.

### Conséquences

- 1) Plus on met d'appareils en parallèle, plus la résistance diminue. Par conséquent, avec la même différence de potentiel, l'intensité du courant dans le circuit principal augmente. **La résistance totale est toujours plus petite que la plus petite des résistances en parallèle.**

Ceci peut être expliqué de manière intuitive : plus on met d'appareils en parallèles, plus il y a de possibilités de passage pour les charges électriques, donc plus le courant passe facilement.

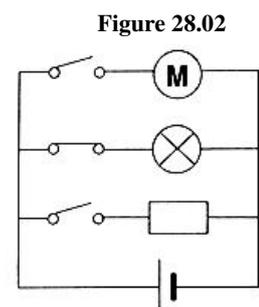


Figure 28.02

- 2) Le voltmètre, placé en parallèle sur les récepteurs, doit nécessairement avoir une résistance interne très grande, sinon l'intensité du courant dans le récepteur serait alors perturbée, ce qui entraînerait une erreur dans la mesure de différence de potentiel.
- 3) Ce type de montage est le plus généralement utilisé ; en effet, la coupure du courant dans un récepteur, n'entraîne pas de coupure dans les autres. Par exemple, les lampes d'un lustre sont montées en parallèle ; la défectuosité d'une ampoule n'empêche pas le fonctionnement des autres. Dans une installation électrique, les différents récepteurs (lampes, radio, TV, etc.) sont montés en parallèle ce qui permet de les faire fonctionner indépendamment les uns des autres (Fig. 28.02)

## Cas particuliers

Cas de 2 résistances :

La formule  $\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$  peut se mettre sous la forme plus pratique  $R_T = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$

Cas de  $n$  résistances identiques  $R$  : Alors  $R_T = \frac{R}{n}$

**Attention :** Nous noterons que la lecture des schémas demande un peu réflexion. Par exemple, les 5 schémas ci-dessous sont équivalents à 3 résistances en parallèle.

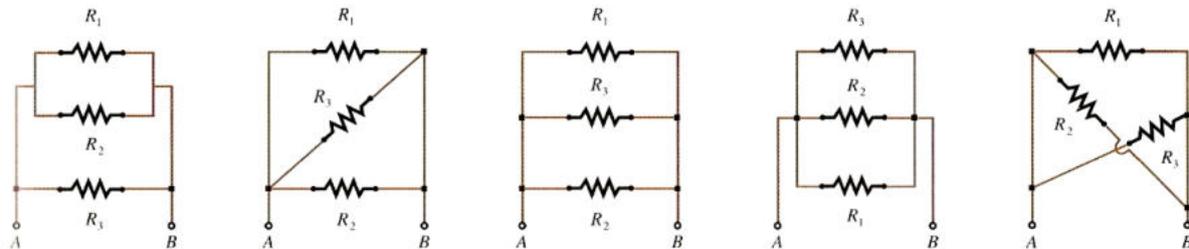


Figure 28.03

## Exemple

Soient deux résistances  $R_1$  et  $R_2$  en parallèle (Fig. 28.04). Si  $R_1 = 20 \Omega$ ,  $R_2 = 40 \Omega$ , et si la tension  $U$  est de 90 V, quelles sont les intensités de courant :  $I$ ,  $I_1$  et  $I_2$  ?

**Solution**

Calculons la résistance totale :  $R_T = \frac{40 \times 20}{40 + 20} = 13.33 \Omega$

Appliquons la loi d'Ohm :  $I = \frac{U}{R_T} = \frac{90}{13.33} = 6.75 \text{ A}$

Pour les autres courants :  $I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{90}{40} = 2.25 \text{ A}$  et  $I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{90}{20} = 4.5 \text{ A}$

Nous vérifions que :  $I = I_1 + I_2 = 2.25 + 4.5 = 6.75 \text{ A}$

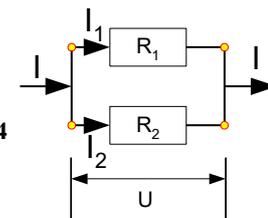


Figure 28.04

## 9 Associations de résistance en parallèle et en série.

La méthode générale consiste à faire des groupements successifs afin d'arriver à une résistance équivalente à l'ensemble des résistances.

### Exemple

Les simplifications successives conduisent à une seule résistance équivalente entre les points A et D. (Figure 29.01)

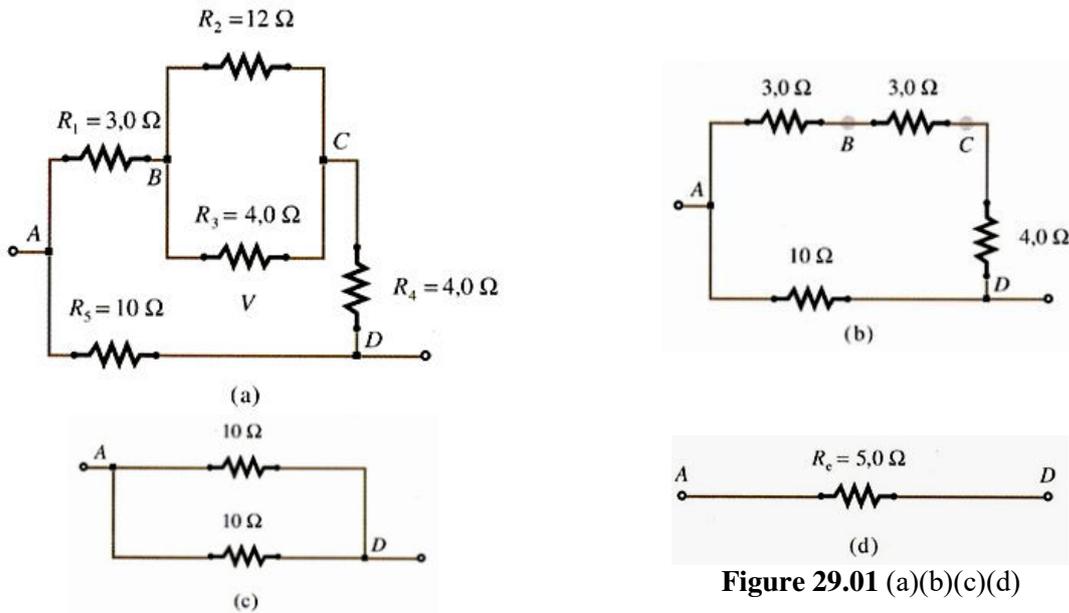
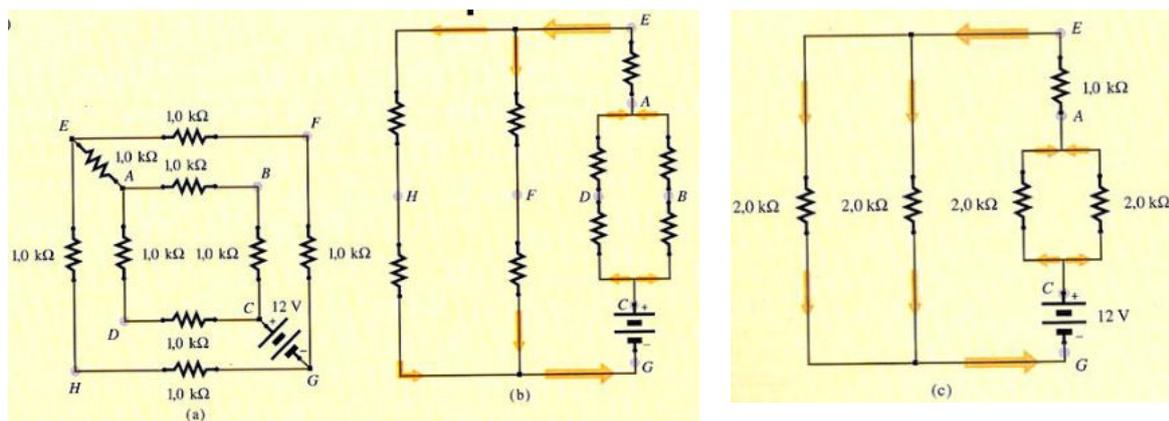
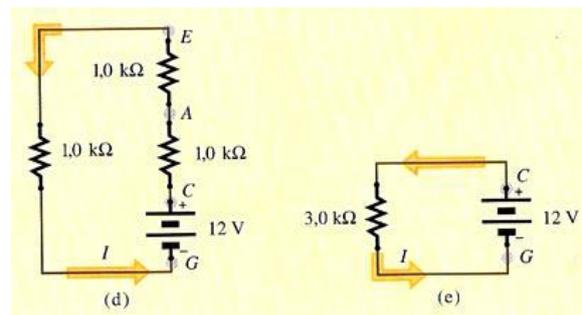


Figure 29.01 (a)(b)(c)(d)

### Exemple



Exemple d'un schéma relativement compliqué et les étapes (a), (b), (c), (d) et (e) qui permettent d'aboutir à une simple résistance. (Figure 29.02)



**Exemple**

Traitons le cas général directement par un exemple :

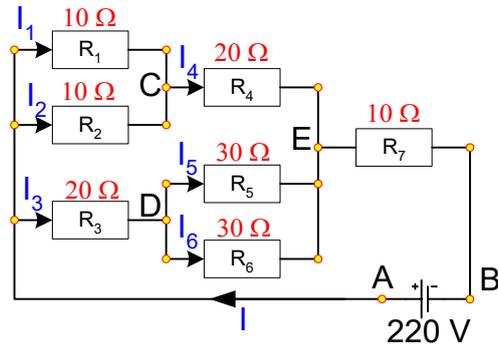


Figure 29.03

Identifions les résistances que l'on peut grouper facilement.  $R_1$  et  $R_2$  d'une part et  $R_5$  et  $R_6$  d'autre part

qui sont en parallèles. Donc :

$$\begin{cases} R_1 = R_2 \rightarrow R_{12} = \frac{R_1}{2} = \frac{10}{2} = 5 \Omega \\ R_5 = R_6 \rightarrow R_{56} = \frac{R_5}{2} = \frac{30}{2} = 15 \Omega \end{cases}$$

Ce qui nous permet de simplifier le schéma :

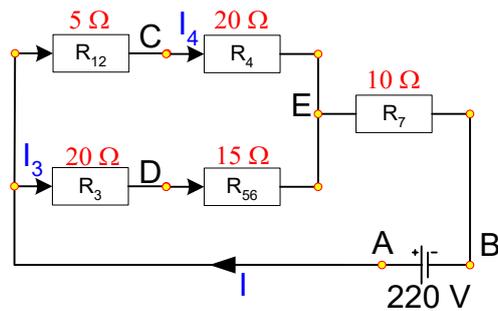


Figure 29.04

Maintenant nous pouvons grouper les résistances :  $R_{12}$  et  $R_4$  d'une part et  $R_3$  et  $R_{56}$  d'autre part qui sont en série.  $R_{124} = R_{12} + R_4 = 5 + 20 = 25 \Omega$  et  $R_{356} = R_3 + R_{56} = 20 + 15 = 35 \Omega$ . Le schéma devient :

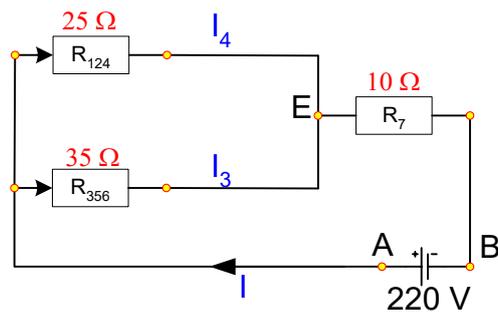


Figure 29.05

Groupons maintenant  $R_{124}$  et  $R_{356}$  qui sont en parallèle :

$$R_{123456} = \frac{R_{124} \cdot R_{356}}{R_{124} + R_{356}} = \frac{25 \times 35}{25 + 35} = 14.58 \Omega$$

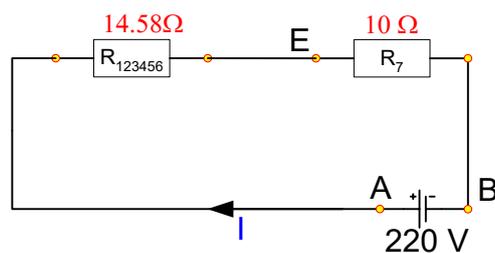


Figure 29.06

Finalement :  $R_T = R_{123456} + R_7 = 14.38 + 10 = \boxed{24.38 \Omega}$

Le courant  $I$  s'obtient par la loi d'Ohm :  $I = \frac{U}{R_T} = \frac{220}{24.58} = \boxed{8.95 \text{ A}}$

Comme  $I$  passe dans  $R_7$  (Fig. 29.06), nous pouvons calculer la chute de tension dans cette résistance :  $U_7 = U_{EB} = IR_7 = 8.95 \times 10 = 89.5 \text{ V}$

Ce qui implique que :  $U_{AE} = U - U_{EB} = 220 - 89.5 = 130.5 \text{ V}$

Calculons maintenant (Fig. 29.05):  $I_4 = \frac{U_{AE}}{R_{124}} = \frac{130.5}{25} = 5.22 \text{ A}$  et  $I_3 = \frac{U_{AE}}{R_{356}} = \frac{130.5}{35} = 3.73 \text{ A}$

De plus (Fig. 29.03)  $\left\{ \begin{array}{l} R_1 = R_2 \rightarrow I_1 = I_2 = \frac{I_4}{2} = \frac{5.22}{2} = 2.61 \text{ A} \\ R_5 = R_6 \rightarrow I_5 = I_6 = \frac{I_3}{2} = \frac{3.73}{2} = 1.87 \text{ A} \end{array} \right.$

Et (Fig. 29.04)  $\left\{ \begin{array}{l} U_{AC} = I_4 R_{12} = 5.22 \times 5 = 26.1 \text{ V} \\ U_{AD} = I_3 R_3 = 3.73 \times 20 = 74.6 \text{ V} \end{array} \right.$

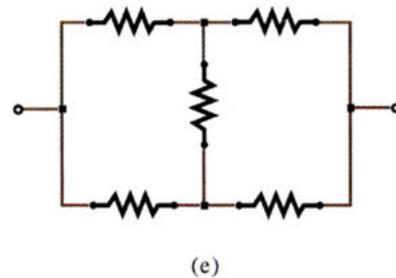
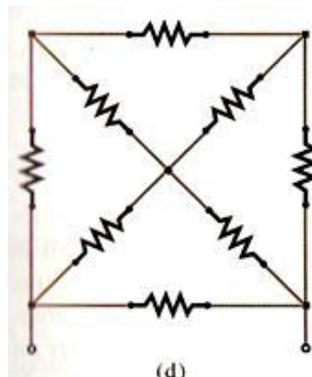
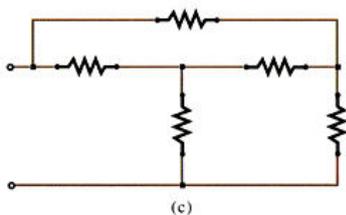
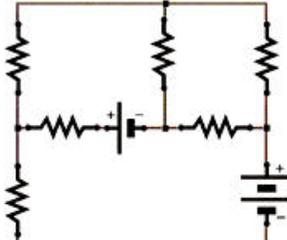
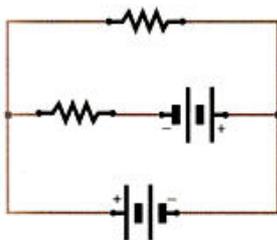
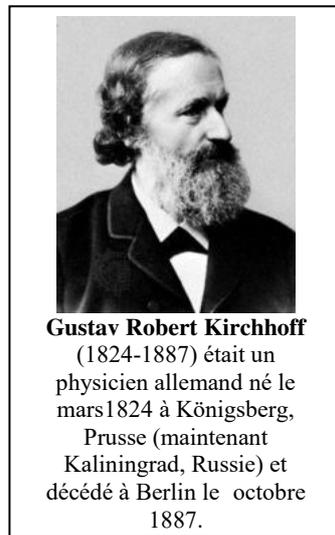
Il reste :  $U_{CE} = R_4 I_4 = 20 \times 5.22 = 104.4 \text{ V}$  et  $U_{DE} = R_{56} I_3 = 15 \times 3.73 = 55.9 \text{ V}$

Nous vérifions :  $U_{AC} + U_{CE} + U_{EB} = 26.1 + 104.4 + 89.5 = 220 \text{ V} = U_{AB}$

ou bien  $U_{AD} + U_{DE} + U_{EB} = 74.6 + 55.9 + 89.5 = 220 \text{ V} = U_{AB}$

## 10 Lois de Kirchhoff

En fait la majorité des arrangements de résistances ne sont ni des arrangements en série ni en parallèle. (Voir Fig. 210.01) Pour résoudre de tels arrangements, nous devons faire appel à la « théorie des circuits ». Celle-ci fait appel à une série de théorèmes et de règles qui permettent le calcul. Cette théorie sort largement du cours et nous n'envisagerons que les lois de Kirchhoff.

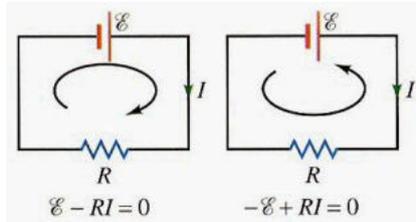


**Figures 210.01** (a)(b)(c)(d)(e) Exemples de montages qui ne sont ni en parallèle ni en série

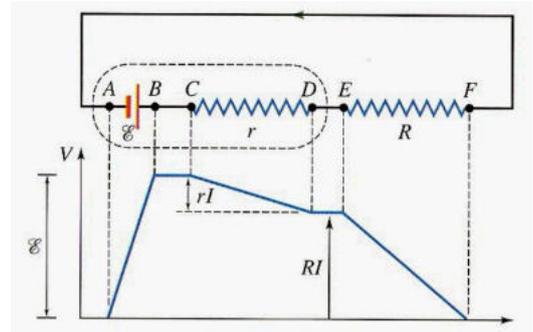
## Loi des mailles

**La somme algébrique des variations de potentiel le long de toute maille fermée du circuit est nulle.**

Cette règle n'est que l'expression du fait que le champ électrique est **conservatif** ; donc si nous commençons à un point arbitraire d'un circuit avec un potentiel donné et nous parcourons une maille fermée jusqu'à notre point de départ, nous retrouvons le même potentiel. (Fig. 210.02)



Nous noterons aussi que pour l'application de la loi des mailles, nous pouvons parcourir le circuit **dans un sens ou dans l'autre**. (Fig. 210.03)



## Loi des nœuds

**La somme de tous les courants qui arrivent à un nœud d'un circuit est égale à la somme de tous les courants, qui le quittent**

Cette règle traduit le fait que, en régime permanent, il n'y a ni accumulation ni disparition de charges dans le circuit. La quantité de charge qui arrive en un point doit être égale à la quantité de charge qui le quitte. (Fig. 210.04)

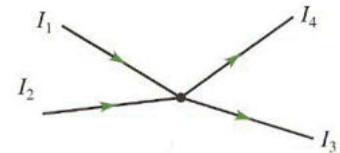


Figure 210.04

## Exemple

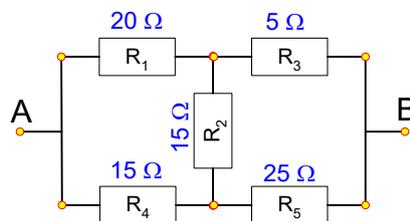


Figure 210.05

Dans le schéma ci-dessus déterminer, tous les courants et toutes les différences de potentiel, sachant que  $U_{AB} = 90 \text{ V}$ . (Fig. 210.05)

## Solution

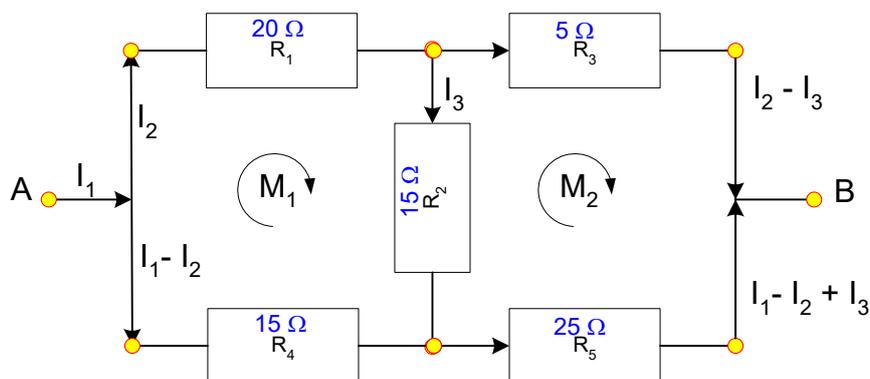


Figure 210.06

Sur la figure 210.06, les courants sont indiqués en utilisant la loi des nœuds.

Appliquons la loi des mailles aux mailles  $M_1$  et  $M_2$ , et exprimons que la chute de potentiel entre A et B vaut 90 V.

$$\begin{cases} M_1 \rightarrow R_1 I_2 + R_2 I_3 - R_4 (I_1 - I_2) = 0 \\ M_2 \rightarrow R_3 (I_2 - I_3) - R_5 (I_1 - I_2 + I_3) - R_2 I_3 = 0 \\ AB \rightarrow R_4 (I_1 - I_2) + R_5 (I_1 - I_2 + I_3) = 90 \end{cases}$$

Remplaçons les résistances par leur valeur, et nous obtenons un système d'équation à trois inconnues.

$$\begin{cases} -15I_1 + 35I_2 + 15I_3 = 0 \\ -25I_1 + 30I_2 - 45I_3 = 0 \\ 40I_1 - 40I_2 + 25I_3 = 90 \end{cases}$$

La résolution de ce système par les méthodes vues en mathématique donne les courants. Nous pouvons en déduire facilement les chutes de tension dans les résistances :

$$\begin{cases} I_1 = 6.423 \text{ A} \\ I_2 = 3.330 \text{ A} \\ I_3 = -1.348 \text{ A} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} U_1 = 66.60 \text{ V} \\ U_2 = -20.22 \text{ V} \\ U_3 = 23.40 \text{ V} \\ U_4 = 46.38 \text{ V} \\ U_5 = 43.62 \text{ V} \end{cases}$$

Le sens de  $I_3$  n'est donc pas celui que nous avons prévu au départ.

En conclusion, le circuit devient :

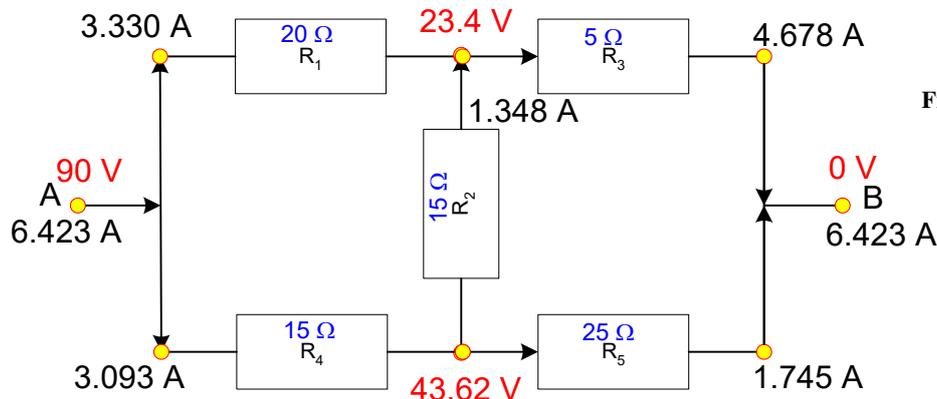


Figure 210.07

## 11. Générateur

### 11.1 Tension électromotrice et résistance interne

Un générateur (GN) est à **vide** lorsque son circuit est **ouvert**. Dans ce cas il ne débite pas de courant.

Un GN est en **charge** lorsque son circuit est **fermé**. Alors il fournit du courant.

Regardons le montage de la figure 211.01. Lorsque le circuit est ouvert le voltmètre placé aux bornes du générateur indique une tension  $U_1$ . Fermons l'interrupteur, le voltmètre indique une tension  $U_2$  **plus petite** que la tension  $U_1$

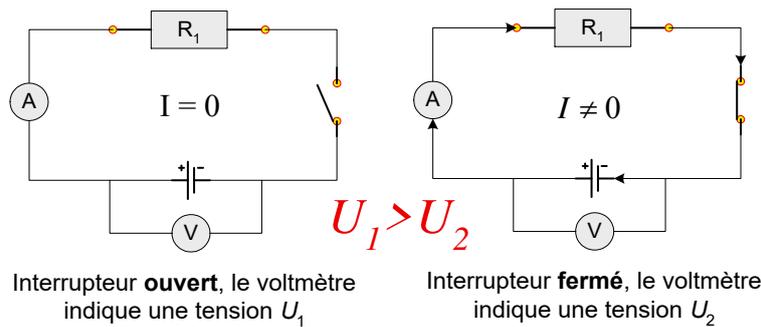


Figure 211.01

Nous interpréterons ce résultat en appliquons la loi d'Ohm. Lorsque nous fermons l'interrupteur, le générateur débite du courant. La charge doit donc être transportée d'une borne à l'autre, à l'intérieur du générateur lui-même, ce qui ne se fait pas librement. En fait, le générateur résiste au courant qui la parcourt dans un sens ou dans l'autre. **Cette résistance interne est un aspect indissociable de tout générateur réel.** Nous désignerons cette résistance par  $R_i$ .

La tension à vide sera appelée **la tension électromotrice (TEM)**. Nous désignerons cette tension électromotrice par  $E$ . (Note : Dans de nombreux ouvrages de physique et d'électrotechnique, la TEM est souvent appelée Force Electromotrice ou fém. Cette dénomination est déconseillée car il n'y a aucune force réellement en action dans ce cas).

## Définition

**La tension électromotrice (TEM), désignée par  $E$ , d'un générateur GN est la tension mesurée à ses bornes en circuit ouvert. Dans ce cas,  $U = E$  si  $I = 0$**

La TEM est le nombre total de VOLTS prenant naissance à l'intérieur du GN.

La naissance de la TEM ( $E$ ) est le phénomène fondamental ; la d.d.p.  $U$  aux bornes du GN est une conséquence du passage du courant. Lorsque le GN est à vide, la dissymétrie se maintient totalement entre les bornes du GN sans qu'il y ait dépense d'énergie. Aucun courant ne circulant, la TEM du GN apparaît entièrement entre les bornes du GN et  $U = E$ .

Faisons maintenant débiter une pile dans un circuit composé uniquement d'une résistance. Si nous diminuons la valeur de la résistance, l'intensité du courant débité va augmenter. Nous constatons que la tension  $U$  diminue elle-aussi.

Cette diminution est linéaire, ce qui nous permet de déduire que la résistance interne obéit à la loi d'Ohm.

**La pente de la droite représente la grandeur de la résistance interne.** (Fig. 211.02)

Nous pouvons donc symboliser un générateur par une tension électromotrice  $E$  en série avec une résistance interne  $R_i$ . (Fig. 211.03). Attention, ceci est un schéma idéalisé. Il n'est physiquement pas possible de séparer  $R_i$ .

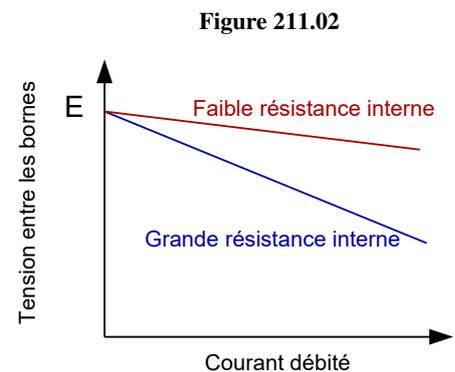


Figure 211.02

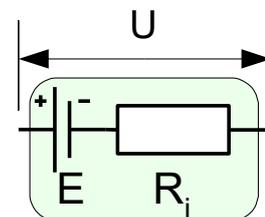


Figure 211.03

## 11.2 Expression de la tension $U$ aux bornes du GN

L'existence d'une résistance interne explique qu'un GN qui débite du courant chauffe. Le courant dégage de la chaleur par effet joule.

La puissance électrique consommée par effet Joule dans le GN :

$$P_{\text{int}} = R_i I \quad \text{C'est de la puissance perdue}$$

La puissance électrique consommée dans le circuit extérieur de résistance  $R$  :

$$P_{ext} = R.I \quad \text{C'est la puissance disponible}$$

La puissance totale fournie par le GN est la puissance électrique consommée dans l'ensemble du circuit :

$$P = P_{int} + P_{ext}$$

Posons que la puissance totale est

$$P = E.I \quad \text{ou} \quad E = \frac{P}{I}$$

La TEM  $E$  est donc égale au quotient de la puissance totale  $P$  sur l'intensité  $I$  du courant qu'il fournit. Nous avons avec cette nouvelle définition :

$$P_{ext} = P - P_{int}$$

$$U.I = E.I - R_i I^2$$

en divisant par  $I$  on a :

$U = E - R_i.I$	$E$	tension totale produite
	$U$	tension réellement disponible aux bornes du GN
	$R_i I$	tension perdue par effet joule dans le GN

*La d.d.p.  $U$  aux bornes d'un GN débitant un courant  $I$  est égale à sa TEM  $E$  diminuée de sa chute de tension due à sa résistance interne.*

*La relation précédente peut se modifier pour permettre le calcul de l'intensité dans le circuit*

$$I = \frac{E - U}{R_i}$$

### Exemple

Quelle est la résistance intérieure d'une batterie de piles qui débite 5 A sous 10 V sachant que le voltmètre branché entre les bornes de la batterie indique 12 V quand le circuit est ouvert ?

### Solution

$$\text{On sait que : } U = E - R_i I \rightarrow R_i = \frac{E - U}{I} = \frac{12 - 10}{5} = 0.4 \Omega$$

## 11.3 Loi d'Ohm pour un GN relié à une résistance R

Loi d'Ohm aux bornes de la résistance  $R$  :  $U = R.I$

Loi d'Ohm aux bornes du GN :  $U = E - R_i.I$

Les deux valeurs sont égales :

$$R.I = E - R_i.I \rightarrow (R + R_i)I = E$$

Et donc

$$I = \frac{E}{R + R_i}$$

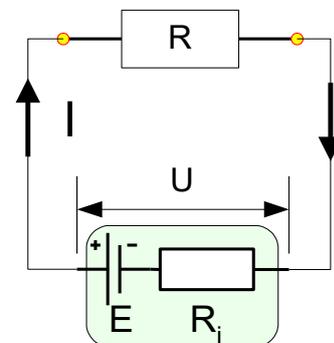


Figure 211.04

**Remarques**

*Si plusieurs résistances sont montées entre les bornes du GN, on les remplace par la résistance équivalente ou résistance totale du circuit.*

**Exemple**

Une résistance  $R$  est raccordée aux bornes d'un générateur. La tension aux bornes du générateur est 100 V, sa TEM est 110 V et sa résistance interne 1  $\Omega$ . Trouvez le courant et la valeur de la résistance  $R$ .

**Solution**

$$\text{Au niveau du générateur : } I = \frac{E - U}{R_i} = \frac{110 - 100}{1} = 10 \text{ A}$$

$$\text{Au niveau de la résistance : } R = \frac{U}{I} = \frac{100}{10} = 10 \Omega$$

**Exemple**

Une résistance  $R$  de 5.9  $\Omega$  est raccordée à une pile de TEM 12 V et de résistance interne 0.1  $\Omega$ . Quelle est la tension aux bornes de la pile ?

**Solution**

$$\text{Calculons d'abord l'intensité du courant : } I = \frac{E}{R_i + R} = \frac{12}{5.9 + 0.1} = 2 \text{ A}$$

$$\text{La tension entre les bornes de la pile est : } U = E - R_i I = 12 - 0.1 \times 2 = 11.8 \text{ V}$$

## 11.4 Groupements de GN

On groupe des GN lorsque la puissance demandée par le circuit extérieur est supérieure à celle capable d'être fournie par un GN

### 11.4.1 Groupement en série

Pôle négatif de chaque GN est relié au pôle positif du suivant par un fil de résistance nulle (Fig. 211.05)

**Propriétés**

*La TEM de l'ensemble est la somme des FEM des différents éléments Dans le cas où tous les éléments ont la même tension  $e$ .*

$$E = ne \quad \begin{array}{l} E \text{ Tension électromotrice totale} \\ n \text{ Nombre d'éléments} \\ e \text{ Tension électromotrice d'un élément} \end{array}$$

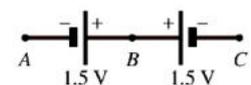
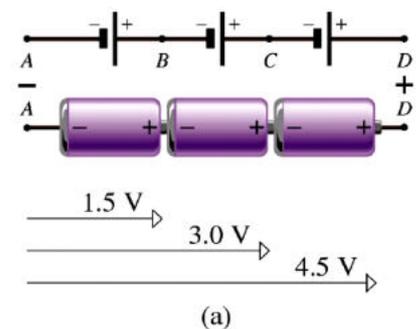
*La résistance interne de l'ensemble  $R_i$  est la somme des résistances internes  $r_i$  des éléments*

$$R_i = nr_i \quad \begin{array}{l} R_i \text{ Résistance interne totale} \\ n \text{ Nombre d'éléments} \\ r_i \text{ Résistance interne d'un élément} \end{array}$$

$$\text{Courant débité est donné par : } I = \frac{E}{R_i + R} = \frac{E}{nr_i + R}$$

**Emploi :** obtention d'une FEM supérieure à celle d'un élément

Figure 211.05



© 2001 Brooks/Cole Publishing ITP

(b)

## 11.4.2 Groupement en parallèle

Les bornes de même nom sont reliées entre elles. (Fig. 211.06)

**Propriétés**

La TEM de l'ensemble est égale à celle d'un élément  $E = e$  La résistance interne de l'ensemble :

$$R_i = \frac{r_i}{n} \quad (n \text{ résistances en //})$$

$$\text{Courant débité : } I = \frac{E}{R_i + R}$$

**Emploi** : obtention de courant n fois celui débité par chaque GN

### Exemple

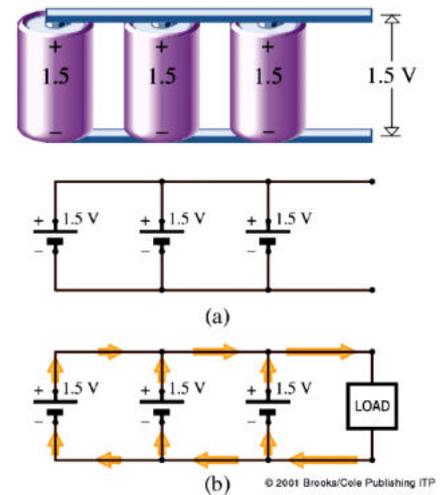
Soit 4 piles de 1.5 V. Quelle est la tension si on les branche en série ou en parallèle ?

**Solution**

En série :  $E = n.e = 4 \times 1.5 = 6 \text{ V}$

En parallèle :  $E = e = 1.5 \text{ V}$

Figure 211.06



## 12. Les récepteurs

### 12.1 Définition

Un récepteur est un appareil qui absorbe de l'énergie électrique et qui la restitue sous une autre forme.

Un récepteur calorifique transforme intégralement en chaleur l'énergie électrique qu'il absorbe.

Les accumulateurs en charge transforment l'énergie électrique en énergie chimique.

Les moteurs en fonctionnement transforment l'énergie électrique en énergie mécanique (et en chaleur perdue)

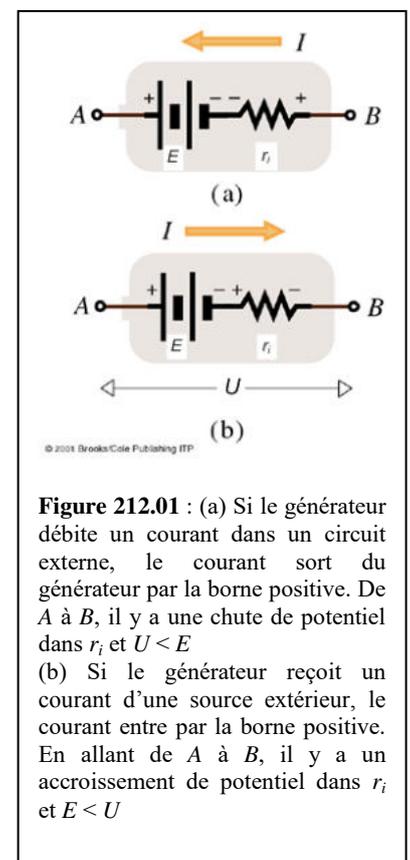
### 12.2 Caractéristiques des récepteurs

#### 12.2.1 Résistance interne $R'$

Comme pour un GN, un moteur en fonctionnement s'échauffe par effet Joule. Ceci est dû à sa résistance interne que l'on notera  $R'$ .

#### 12.2.1 Tension contre-électromotrice $E'$

Expliquons ce que représente cette TCEM par un exemple (Fig. 212.01)



**Figure 212.01** : (a) Si le générateur débite un courant dans un circuit externe, le courant sort du générateur par la borne positive. De A à B, il y a une chute de potentiel dans  $r_i$  et  $U < E$

(b) Si le générateur reçoit un courant d'une source extérieure, le courant entre par la borne positive. En allant de A à B, il y a un accroissement de potentiel dans  $r_i$  et  $E < U$

Pour charger une batterie, il faut lui fournir un courant de sens inverse à celui qu'elle fournit. La tension appliquée  $U$  et la TEM  $E$  de la batterie sont en opposition. Pour que le courant circule, il faut que  $U$  soit supérieure à  $E$ .

La TEM agissant en sens inverse du courant et s'opposant à son passage est appelée TCEM du récepteur et se note  $E'$ .

En conclusion, la TCEM  $E'$  est le nombre de volts prenant naissance à l'intérieur d'un récepteur par suite d'une réaction qui s'y produit et qui tend à s'opposer au passage du courant.

*On peut considérer une TCEM comme une TEM inversée.*

## 12.3 Expression de la tension aux bornes du récepteur

La puissance consommée par effet Joule dans le récepteur :  $P_{\text{int}} = R' \cdot I^2$

La puissance électrique  $P'$  est transformée à l'intérieur du récepteur en puissance mécanique ou chimique.

On définit la TCEM  $E'$  d'un récepteur par le quotient de la puissance  $P'$  sur l'intensité du courant  $I$  qui le traverse :  $E' = \frac{P'}{I}$

La puissance  $P$  totale consommée par le récepteur est apportée par l'extérieur sous forme électrique

$$P = U \cdot I$$

$$P = P_{\text{int}} + P'$$

$$UI = R' I^2 + E' I$$

Et donc :

$$U = E' + R' I$$

La d.d.p aux bornes d'un récepteur est égale à la tension à l'intérieur du récepteur augmentée de la TCEM de ce récepteur

### Remarque

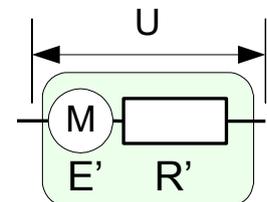
Lorsqu'on empêche le moteur de tourner, il ne fournit pas d'énergie mécanique et il se comporte comme une résistance morte  $R'$ .

Dans ces conditions, la mesure de la tension à ses bornes et de l'intensité du courant permet de trouver  $R'$  par simple application de la loi d'ohm.

Un récepteur peut donc être schématisé par le symbole suivant (Figure 212.02)

**De nouveau, il est important de comprendre que l'on ne peut séparer physiquement la résistance interne  $R'$  et le récepteur  $M$**

Figure 212.02



### Exemple

Un récepteur de résistance interne  $3 \Omega$  et présentant une TCEM de  $50 \text{ V}$  est alimentée par une tension de  $80 \text{ V}$ . Quel est le courant absorbé ?

### Solution

On applique la formule :  $I = \frac{U - E'}{R'} = \frac{80 - 50}{3} = 10 \text{ A}$

## 13 Loi d'Ohm pour un circuit fermé complet

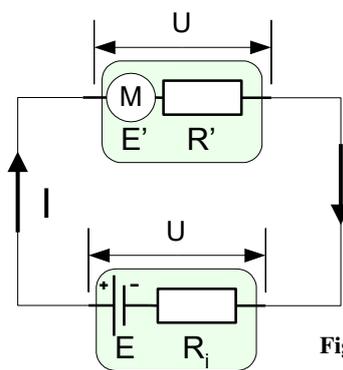


Figure 213.01

Prenons le schéma de la figure 213.01

Aux bornes du GN :  $U = E - R_i I$

Aux bornes du récepteur :  $U = E' - R' I$

Ces 2 expressions étant identiques :  $E - R_i I = E' - R' I$

L'intensité du courant dans le circuit est alors :

$$I = \frac{E - E'}{R_i + R'}$$

### Exemple

Un générateur de tension 10 V et TEM 12 V a une résistance interne  $R_i$  de 0.2  $\Omega$ . Il alimente un petit moteur de TCEM de 8 V et de résistance interne de 0.4  $\Omega$ . Quelle est l'intensité du courant ?

### Solution

Appliquons la formule :  $I = \frac{E - E'}{R_i + R'} = \frac{12 - 10}{0.2 + 0.4} = 6.67 \text{ A}$

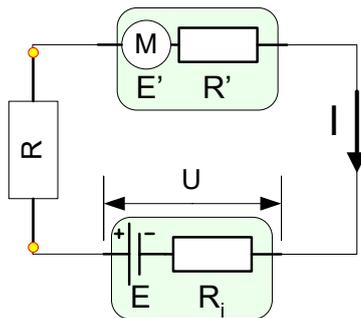


Figure 213.02

Si le circuit comporte en plus une résistance R (celle des fils par exemple) (Fig. 231.02)

$$I = \frac{E - E'}{R_i + R' + R}$$

### Conclusions

Si dans le circuit on trouve, des TEM, des TCEM et des résistances mortes en série alors on effectue

- la somme des TEM
- la somme des TCEM
- la somme des résistances internes et externes

L'intensité du courant dans le circuit est donnée par :

$$I = \frac{\text{Somme des TEM} - \text{Somme des TCEM}}{\text{Somme des résistances}} = \frac{\sum \text{TEM} - \sum \text{TCEM}}{\sum R}$$

### Exemple

Une batterie de résistance interne 0.2  $\Omega$  et présentant encore une TEM de 18 V est rechargée par une autre batterie de 24 V de résistance interne 0.3  $\Omega$ . La ligne qui connecte les deux batteries à une résistance de 0.1  $\Omega$ .

- a) Calculer l'intensité du courant qui circule dans le circuit.
- b) Calculer les différentes chutes de tension dans les diverses résistances le long de la ligne et calculer les puissances perdues par effet joule.
- c) Calculer la puissance délivrée par la batterie nourricière de 24 V et la puissance absorbée par la batterie de 18 V.
- d) En déduire le rendement du processus (Energie absorbée/énergie fournie)

Voir figure 213.03

**Solution**

$$a) I = \frac{E - E'}{R_i + R + R'} = \frac{24 - 18}{0.3 + 0.1 + 0.2} = 10 \text{ A}$$

b) Etablissons un petit tableau :

	Chute de tension	Perte de puissance par effet joule
$R_i$	$U_i = R_i I = 0.3 \times 10 = 3 \text{ V}$	$P_i = R_i I^2 = 0.3 \times 10^2 = 30 \text{ J}$
$R$	$U = R I = 0.1 \times 10 = 1 \text{ V}$	$P = R I^2 = 0.1 \times 10^2 = 10 \text{ J}$
$R'$	$U' = R' I = 0.2 \times 10 = 2 \text{ V}$	$P' = R' I^2 = 0.2 \times 10^2 = 20 \text{ J}$

Chute de tension totale dans les résistances : 6 V

Perte de puissance dans les résistances : 60 J

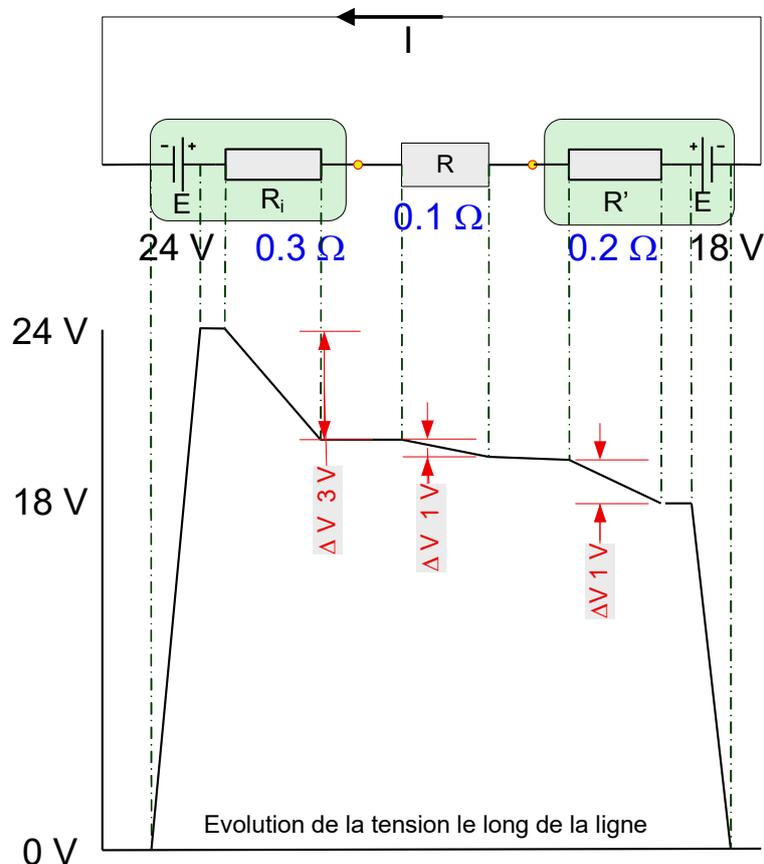
$$c) \text{ Puissance délivrée par la batterie de } 24 \text{ V} : P_{del} = EI = 24 \times 10 = 240 \text{ J}$$

$$\text{ Puissance absorbée par la deuxième batterie : } P_{abs} = E' I = 18 \times 10 = 180 \text{ J}$$

$$d) \text{ Rendement du processus : } \eta = \frac{P_{abs}}{P_{del}} = \frac{180}{240} = 75\%$$

Autrement dit 25% de l'énergie est perdue.

Figure 213.03



## 14 Installation domestique

Le confort procuré par l'électricité est devenu d'une telle évidence de nos jours que l'on en profite tous les jours sans vraiment s'en rendre compte. Nombreux sont les foyers qui possèdent à la fois une machine à laver, un séchoir, un boiler, une cuisinière, un lave-vaisselle, un four à micro-ondes, un grille-pain, etc.

Les installations électriques domestiques existantes sont-elles conçues pour supporter tous ces appareils qui, de plus, fonctionnent souvent simultanément?

Toute installation électrique moderne doit répondre aux impositions du R.G.I.E (Règlement Général Installations Électriques) et doit être agréée par un organisme de contrôle reconnu par l'État (par ex. : AIBVincotte, G. Thomas, ...). Ceci est d'ailleurs une condition indispensable pour que les sociétés d'électricité acceptent de fournir du courant électrique à l'installation. Insistons cependant sur le fait que les règlements sont fréquemment sujets à modification et différent (légèrement) d'un organisme d'agrément à l'autre. Si nous observons le schéma d'une installation électrique domestique, nous pouvons faire plusieurs observations.

1) L'installation comporte des fils conducteurs de sections bien précises qui varient selon les circuits.

Un circuit ne comportant que quelques ampoules, par exemple, peut être constitué de fils de section de  $1,5 \text{ mm}^2$ . Les circuits « normaux » comportent des fils de section de  $2,5 \text{ mm}^2$ . On note également la présence de fils de section de 4, 6 ou  $10 \text{ mm}^2$  : ceux-ci sont utilisés dans des circuits électriques comportant des appareils de plus forte puissance électrique comme une cuisinière, un chauffe-eau, ... ou pour relier un tableau électrique secondaire à un tableau électrique principal.

On constate donc que plus un circuit électrique comprend des appareils de puissance élevée, plus la section des fils constituant le circuit est importante.

Ceci s'explique comme suit: plus un circuit comprend des appareils de puissance élevée, plus l'intensité du courant électrique circulant dans les fils conducteurs du circuit est grande et plus l'effet Joule est important, ce qui est évidemment un inconvénient.

Si on veut que cet effet Joule ne soit pas trop important, il faut alors prendre des fils conducteurs de résistance d'autant plus petite que le circuit comprend des appareils de puissance élevée. Comme la résistance d'un fil électrique conducteur est inversement proportionnelle à sa section (loi de Pouillet), les fils électriques doivent donc être d'autant plus gros que la puissance des appareils est élevée.

2) L'installation électrique comporte également des *disjoncteurs*

On en retrouve dans tous les circuits aussi bien dans le circuit principal que dans les circuits secondaires. Leur rôle est d'interrompre immédiatement l'arrivée de courant en cas de surintensité dans un circuit. Cette surintensité peut provenir d'un court-circuit ou parce qu'il y a trop d'appareils ou des appareils de puissance trop élevée dans le circuit. (Figure 214.04)

Une surintensité dans un circuit est extrêmement dangereuse par ce qu'elle va amener une surchauffe des fils conducteurs (effet Joule) qui pourrait amener une rupture du circuit (dans un mur par exemple ...) ou, plus grave encore, un incendie.

Le type de disjoncteur que l'on place dépend évidemment des sections des fils conducteurs du circuit auquel il est relié: un fil conducteur de section  $2,5 \text{ mm}^2$ , par exemple, doit être protégé par un disjoncteur de 20

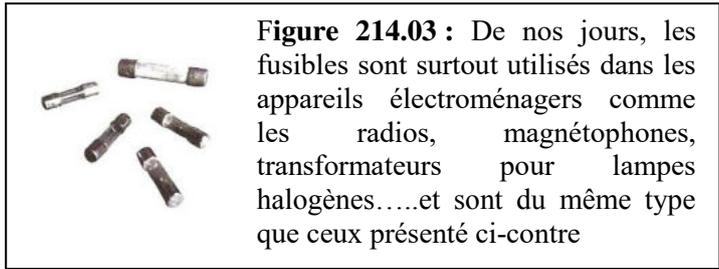
**Figure 214.01** : A l'arrivée du courant, le fournisseur d'électricité (par exemple Electrabel) place un compteur et un disjoncteur général.



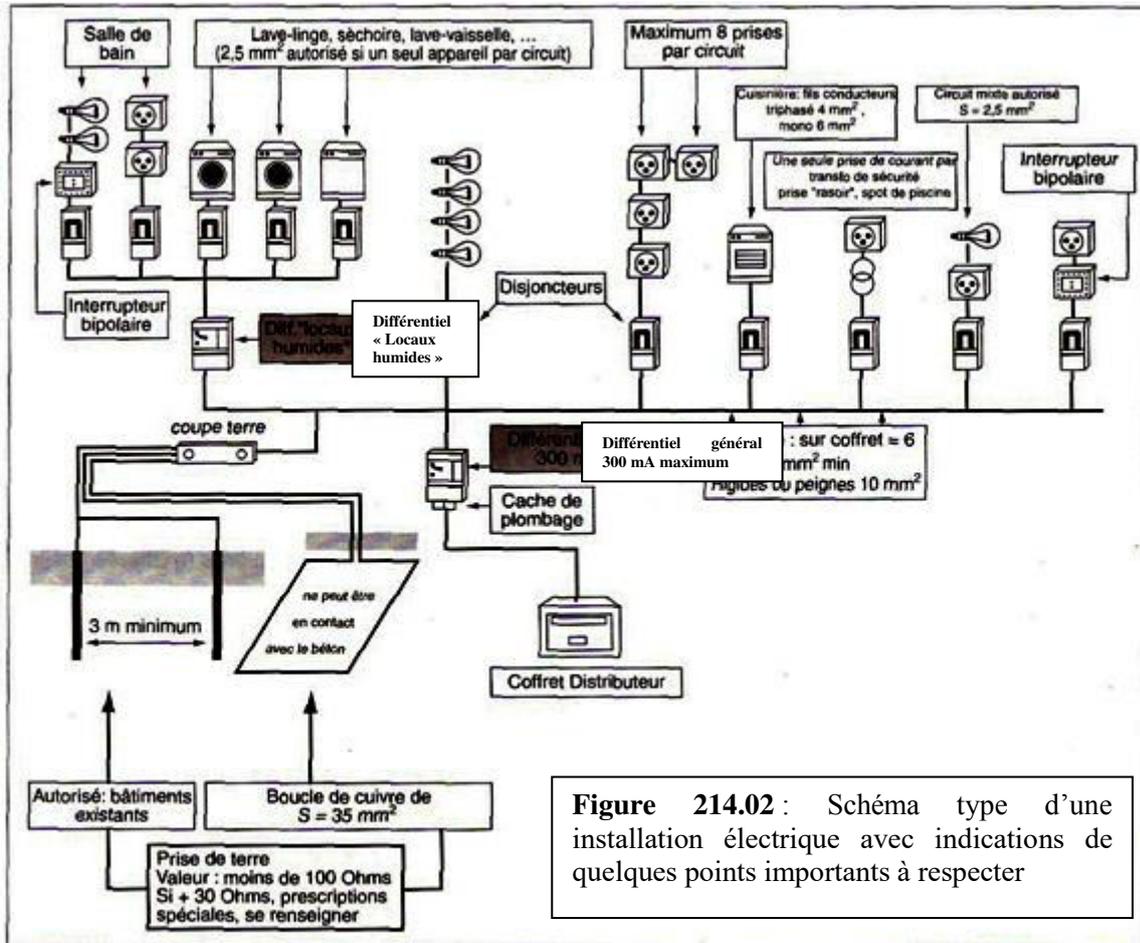
**Figure 214.04** : Dans les vieilles installations domestiques on trouve encore des fusibles à la place des disjoncteurs. Ceux-ci sont constitués d'un fil de section beaucoup plus petite que dans les circuits dans lesquels ils ont placés. Si une surintensité apparaît dans un circuit, c'est le fil du fusible, qui en premier lieu va surchauffer et se rompre empêchant alors le courant de continuer à circuler.

A maximum. Le principe de fonctionnement du disjoncteur sera expliqué plus tard, comme application du champ magnétique.

Notons encore que dans les plus vieilles installations domestiques, on trouve des **fusibles** à la place des disjoncteurs. Ceux-ci sont constitués d'un fil de section beaucoup plus petite que les circuits dans lesquels ils sont placés. Si une surintensité apparaît dans un circuit, c'est le fil du fusible qui, en premier lieu va surchauffer et se rompre, empêchant alors le courant de continuer à circuler dans le circuit.



**Figure 214.03 :** De nos jours, les fusibles sont surtout utilisés dans les appareils électroménagers comme les radios, magnétophones, transformateurs pour lampes halogènes.....et sont du même type que ceux présenté ci-contre



**Figure 214.02 :** Schéma type d'une installation électrique avec indications de quelques points importants à respecter

Extrait du schéma explicatif de G. Thomas, organisme agréé par l'État, décrivant quelques points importants du règlement R.G.I.E. en ce qui concerne les installations domestiques (nouvelles et anciennes).

3) L'installation électrique comporte également des **disjoncteurs différentiels**.

Ceux-ci réagissent à la moindre fuite de courant: ils déconnectent le circuit électrique lorsqu'un courant dans une des lignes électriques s'écarte de son chemin normal et se dirige vers la terre (en cas de détérioration d'un fil ou par ce qu'une personne touche un fil électrique sous tension par exemple).

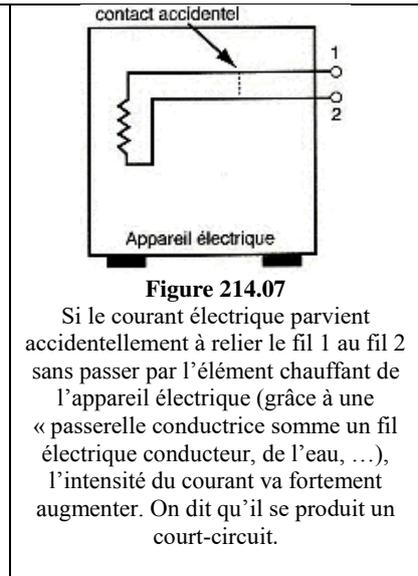
Ces disjoncteurs différentiels comparent en effet à tout moment le courant dans un des deux fils conducteurs (courant d'entrée) avec le courant dans l'autre fil (courant de sortie) et déclenchent lorsque la différence dépasse une certaine valeur.



**Figure 214.05 :** Disjoncteur : On les trouve dans tous les circuits : aussi bien dans le circuit principal que secondaire. Leur rôle est d'interrompre immédiatement l'arrivée de courant en cas de surintensité.

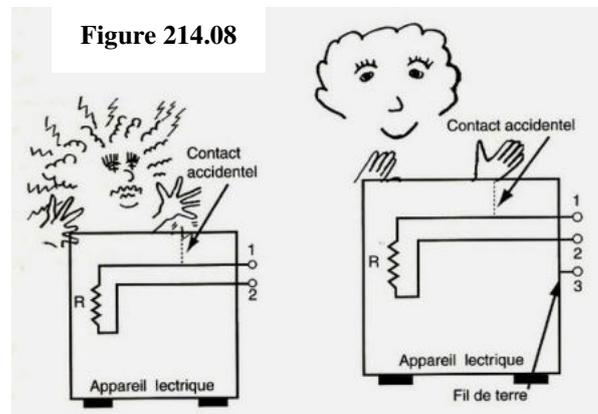


**Figure 214.06 :** Les différentiels réagissent à la moindre fuite de courant. Ils déconnectent le circuit électrique lorsqu'un courant dans une des lignes s'écarte de son chemin normal et se dirige vers la terre.



**Figure 214.07**  
Si le courant électrique parvient accidentellement à relier le fil 1 au fil 2 sans passer par l'élément chauffant de l'appareil électrique (grâce à une « passerelle conductrice comme un fil électrique conducteur, de l'eau, ... ), l'intensité du courant va fortement augmenter. On dit qu'il se produit un court-circuit.

4) Chaque circuit comporte au minimum 3 fils conducteurs: Les deux premiers fils servent à acheminer le courant électrique. Le troisième, appelé fil *de terre* sert, comme son nom l'indique à connecter à la terre, la masse métallique des appareils électriques ainsi que les canalisations d'eau. On comprend immédiatement son rôle: suite à un défaut d'un appareil électrique ou d'une canalisation, les parties métalliques de l'appareil pourraient être mises en contact avec l'un des deux fils acheminant le courant. Si une personne touche alors la masse métallique de l'appareil et que cet appareil n'est pas relié à la terre, un courant de fuite va naître à travers la personne. Le risque d'électrocution dans de telles conditions est alors bien réel. Si par contre, l'appareil électrique est correctement relié à la terre le courant de fuite passera directement à travers le fil de terre, celui-ci étant meilleur conducteur que le corps humain (la résistance maximale imposée au circuit de terre est de 100 ohms).

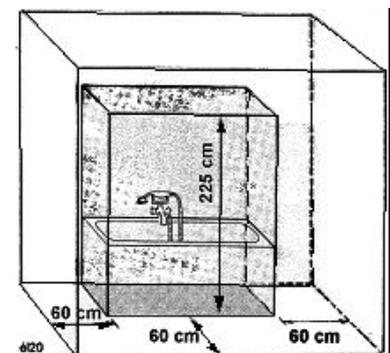


**Figure 214.08**

### Danger de l'électricité

Le corps humain est **très sensible** au courant électrique. Le courant le plus dangereux étant celui qui va de haut en bas, car il passe par le cœur. Une intensité de quelques mA (50 mA) suffit à provoquer un arrêt cardiaque. On notera donc que le courant qui rentre par la main droite est moins dangereux que celui qui entre par la main gauche, car le cœur est à gauche.

De plus le courant passera d'autant mieux que la résistance est faible. Par conséquent, on ne touchera pas des fils électriques si on **les pieds dans l'eau** (l'eau est un très bon conducteur). La résistance du corps humain est de l'ordre de 1000 à 100 000  $\Omega$ . Conséquence immédiate : dans les salles de bains, les cuisines, etc. on est obligé de respecter des **distances de sécurité** pour éviter l'on ne touche les prises de courant quand on est mouillé. Il convient aussi d'être très prudent quand on veut sauver une personne électrocutée, car le courant passe d'un corps à un autre. On coupera **d'abord le courant**.



**Figure 214.09**

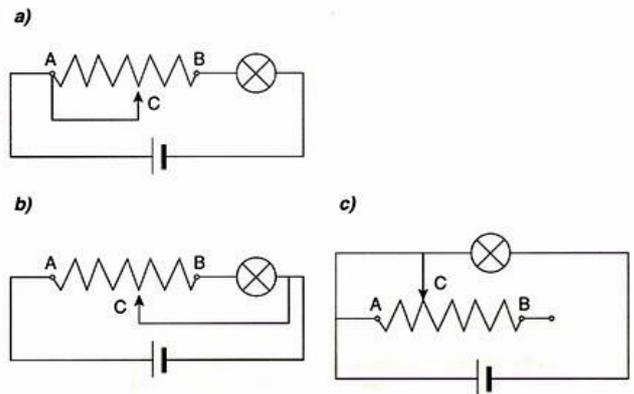


## 15. Exercices

### 15.1 Intensité, tension, loi d'Ohm, loi de Joule

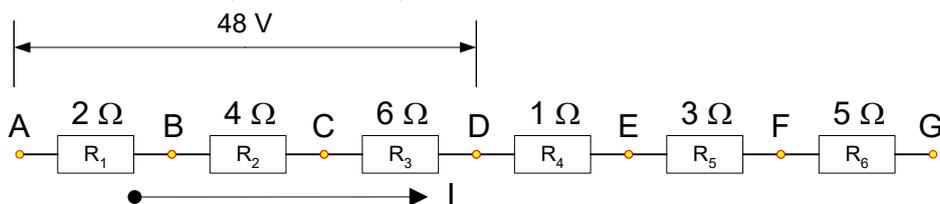
- 1) Quelle est l'intensité du courant qui transporte 360 C en 3 minutes ? (R : 2 A)
- 2) Combien de temps a-t-il fallu à un courant de 4 A pour transporter 8 064 C ?  
(R : 2016 s ou 33 min 36s)
- 3) Quelle intensité de courant faut-il prévoir pour faire passer 60 Ah,  
a) en 20 s ; b) en 20 min ; c) en 20 h  
(R : 10 800 A ; 180 A ; 3 A)
- 4) Quelle est la quantité d'électricité transportée en 15 min par un courant de 16 A ?  
(R : 4 Ah, ou 14 400 C)
- 5) Pendant combien de temps un courant de 0.5 A a-t-il circulé si la quantité d'électricité transportée a été de 12 600 C ? (R : 7 h)
- 6) Quelle est l'intensité du courant qui transporte 20 Ah en 2 h 30 min ? (R : 8 A)
- 7) Évaluez successivement en coulombs et en ampère-heure la quantité d'électricité que transporte en 400 h un courant de 525 mA. (R : 756 000 C ou 210 Ah)
- 8) Une quantité d'électricité de 2160 C a été transportée par un courant de 1.8 A. En combien de temps ?  
(R : 20 min)
- 9) Une batterie d'accumulateur a une capacité de 90 Ah, c'est-à-dire quelle peut fournir une quantité d'électricité de 90 Ah. Elle débite un courant de 8 A pendant 5 h 5 min. Pendant combien de temps pourra-t-elle encore fournir un courant de 10 A ? (R : 4 h 48 min)
- 10) La capacité utile d'un accumulateur est 45 Ah.
  - a. Qu'est-ce que cela signifie ?
  - b. Le temps de décharge étant 18 h, quelle est l'intensité du courant ? (R 2.5 A)
  - c. Le courant de charge étant de 6 A, quel est le temps de recharge ? (R 7 h 30 min)
- 11) Quelle est la puissance d'un fer à repasser branché sur 130 V et qui absorbe 7 A ? (R : 910 W)
- 12) Quel courant passe-t-il dans l'ampoule d'un phare d'auto dont la puissance est de 45 W si la batterie donne 6 V ? (R : 7.5 A)
- 13) Une ampoule de 6 W absorbe un courant de 0.5 A. Quelle est la tension aux bornes de la batterie qui l'alimente ? (R : 12 V)
- 14) Un récepteur de 600 W fonctionne pendant 20 min. Quelle est l'énergie consommée ? (R : 200 Wh ou 720 000 J)
- 15) Quelle puissance est capable d'effectuer un travail de 10 Wh en 15 min ? (R : 40 W)
- 16) Une différence de potentiel de 80 V est appliquée à un appareil constitué d'une simple résistance de 16 Ω. Quelle est la puissance de cet appareil ? (R : 400 W)
- 17) Le filament d'une lampe fonctionnant sur 212 V est traversé en 5 h par une quantité d'électricité de 1 Ah. Quelle est la résistance du filament ? Quelle est la puissance de la lampe ? (R : 1060 Ω ; 42.4 W)
- 18) Quelle est la puissance d'un fer à souder dont la résistance est de 260 Ω si le courant qu'il absorbe est de 0.5 A ? (R : 65 W)
- 19) Une résistance traversée par 2 A est branchée sur un secteur de 110 V. Calculez la valeur de la résistance et l'énergie qu'elle consomme en 12 min ? (55 Ω, 44 Wh ou 158 400 J)

- 20) Sur une lampe il est indiqué : 120 V, 100 W. Quel courant cette lampe absorbe-t-elle en fonctionnement normal ? Quelle est la résistance de son filament ? (R : 0.83 A ; 144  $\Omega$ )
- 21) Un radiateur absorbe un courant de 15 A sous 220 V. Calculez la résistance du radiateur, la puissance absorbée, l'énergie absorbée après 3 heures, le prix de la consommation si le kWh coûte 0.15 €. (R : 14.6  $\Omega$  ; 3300 W ; 9.9 kWh ; 1.485 €)
- 22) Un récepteur traversé par un courant constant de 2.4 A pendant 20 min a consommé 175 Wh. Quelle est le d.d.p. à ses bornes ? Quelle est la quantité d'électricité absorbée ? (R : 220 V, 0.8 Ah)
- 23) Un radiateur porte les indications 120 V - 600 W. Calculez (a) le courant qu'il absorbe, (b) la quantité d'électricité qui le traverse en 2 h 30 min. (c) l'énergie qu'il absorbe pendant ce temps. (R : 5 A ; 12.5 Ah ; 1.5 kWh)
- 24) En, 15 s, il est passé 525 C dans un récepteur branché sur 120 V. Quelle énergie a-t-il consommée ? (R : 63 000 J ou 17.5 Wh)
- 25) Une lampe alimentée à 220 V absorbe 800 000 J en 2 h 13 min 20 s. Quelle intensité de courant la traverse ? (R 0.545 A)
- 26) Un appareil soumis à une d.d.p. de 150 V est traversé par un courant de 8 A pendant 15 min. Quelle est sa consommation ? Quelle quantité d'électricité l'a traversé pendant ce temps ? (R : 300 Wh ou 1 080 000 J ; 2 Ah ou 7 200 C)
- 27) Un fer à repasser électrique de 440 W est traversé par un courant de 4 A. Calculez la longueur du fil qui constitue la résistance chauffante si le diamètre de ce fil est de 0.2 mm et sa résistivité de 1  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ . Quelle énergie calorifique est libérée par minute ? (R : 0.86 m ; 26400 J ou 7.3 Wh)
- 28) Le moteur d'un appareil ménager, enfermé dans un coffret étanche, fournit une puissance utile de 180 W en absorbant 2.6 A sous 125 V. Calculez son rendement. Etant donné que toute l'énergie perdue pendant le fonctionnement du moteur est transformée en chaleur, quelle énergie calorifique est dégagée dans le coffret en 15 min de fonctionnement de l'appareil? (R : environ 57 % ; 130 500 J)
- 29) Un fil chauffant de 24  $\Omega$ , parcouru par du courant absorbe 600 W. Calculez (a) le courant, (b) l'énergie consommée en 1 h, (c) l'énergie calorifique par le fil à chaque min. (R : 5 A ; 600 Wh ; 36 000 J)
- 30) Pour chacun de ces 3 montages, décrire en quelques lignes ce qui se passe lorsqu'on déplace le curseur de A vers B. (Par exemple : l'intensité dans l'ampoule augmente, elle diminue, il y a un court-circuit,...)

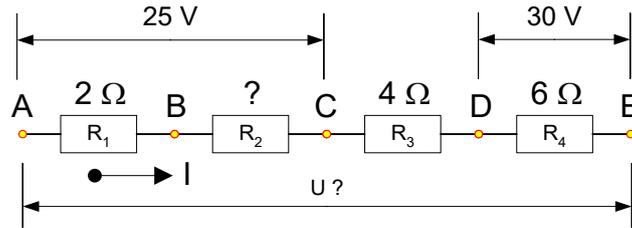


## 15.2 Exercices sur les résistances en série et en //

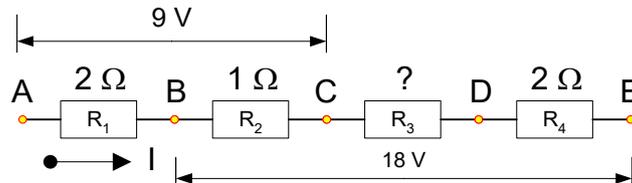
- Trois résistances 4  $\Omega$ , 6  $\Omega$  et 10  $\Omega$  sont raccordées en série sous 100 V. Calculer la résistance équivalente, le courant, les tensions partielles, et la puissance totale (R : 20  $\Omega$ , 5 A, ....., 500 W)
- Trouver UFG et UAG (R : 20 V ; 84 V)



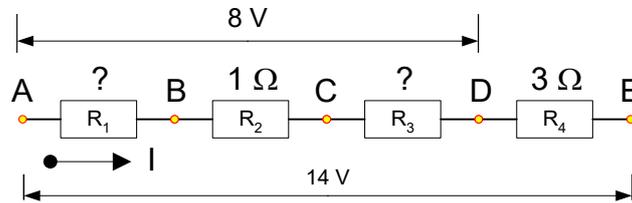
3. Trouvez  $R_2$  et  $U$  (de deux façons) ( $R : 3 \Omega, 75 V$ )



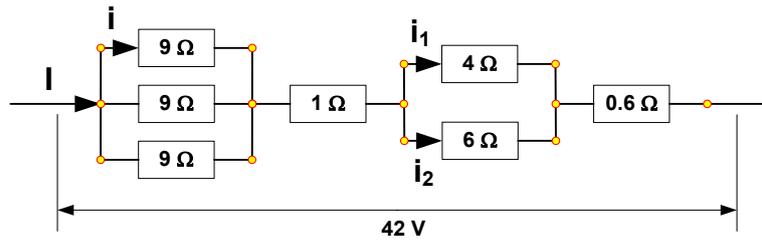
4. Trouvez  $R_3$  et  $U_{AE}$  ( $R 3 \Omega ; 24 V$ )



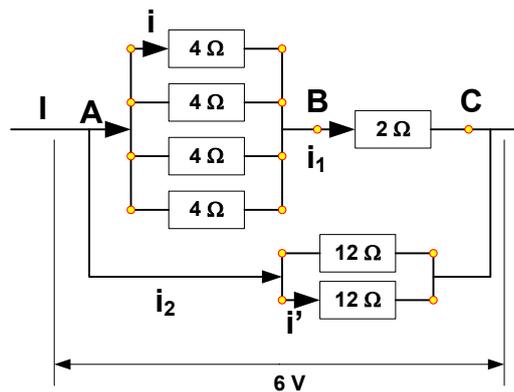
5. Sachant que  $P_3 = 4 W$ , trouver  $R_1$  et  $R_3$  ( $R 2 \Omega ; 1 \Omega$ )



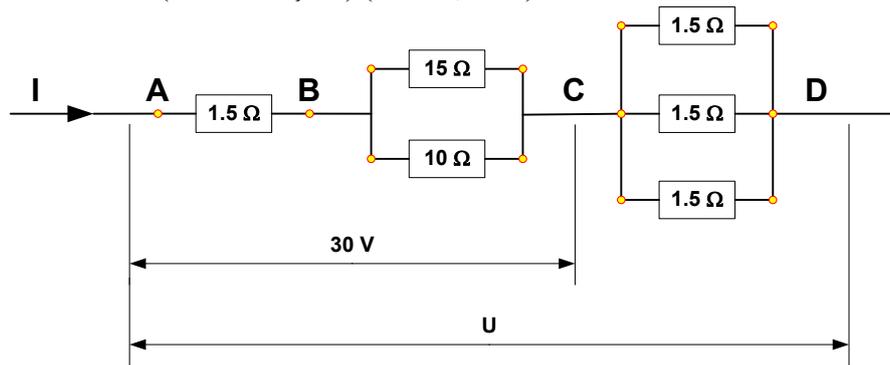
6. Trouvez :  $I - i_1 - i_2 - i$  ( $R : 6 A ; 3.6 A ; 2.4 A ; 2 A$ )



7. Déterminer :  $R - I - i_1 - i_2 - i - i'$  ( $R : 2 \Omega - 3 A - 2 A - 1 A - 0.5 A - 0.5 A$ )

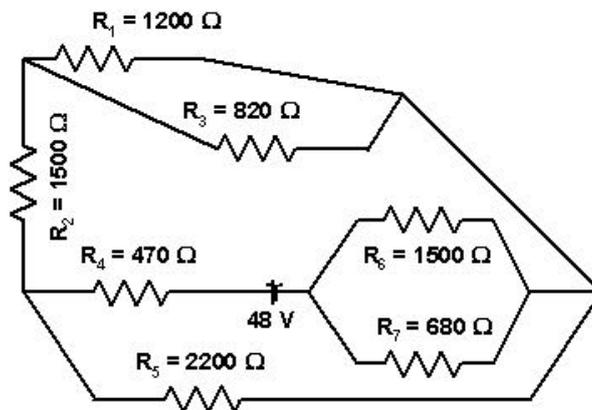
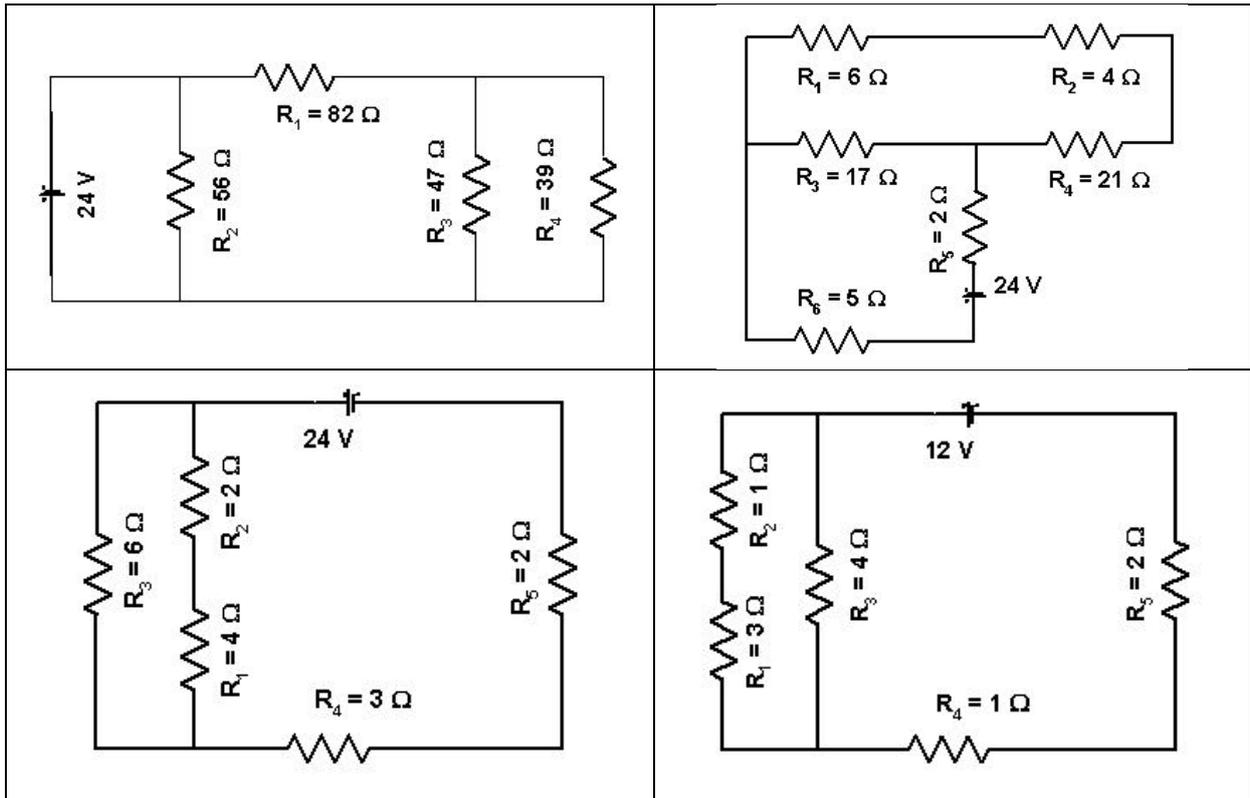


8. Déterminez I et U (de deux façons) ( $R : 4 A, 32 V$ )

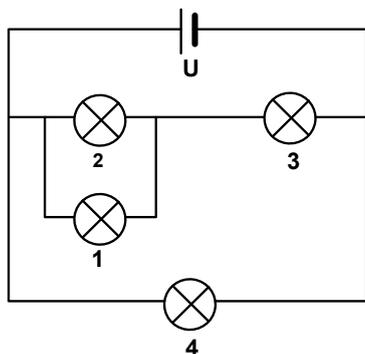


9. Trois résistances :  $2 \Omega, 5 \Omega$  et  $10 \Omega$  sont raccordées en parallèle sous  $250 V$ . Calculez la résistance équivalente, le courant total et les courants partiels. ( $R : 1.25 \Omega ; 200 A ; 50 A ; 25 A$ )
10. Deux résistances  $10 \Omega$  et  $40 \Omega$  sont raccordées en dérivation sous  $200 V$ . Calculez la résistance équivalente, le courant total, les courants partiels, les puissances partielles, la puissance totale et l'énergie absorbée en  $10 h$ . ( $R : 8 \Omega ; 25 A, 5 A, 4000 W, 1000 W ; 5000 W, 50 kWh$ )
11. On applique  $60 V$  à un ensemble de 8 résistances de  $120 \Omega$  raccordées en parallèle. Calculez la résistance équivalente, le courant total et les courants partiels. ( $R : 15 \Omega ; 4 A ; 0.5 A$ )
12. Une résistance de  $5 \Omega$  dans laquelle il passe  $6 A$  est raccordée en dérivation avec une deuxième résistance. L'ensemble absorbe  $16 A$  ? Quelle est la valeur de la deuxième résistance ? ( $R : 3 \Omega$ )
13. Pour les circuits suivants déterminer : la résistance totale, le courant qui passe dans chaque résistance, le courant débité par le générateur et la différence de potentiel aux bornes de chaque résistance.

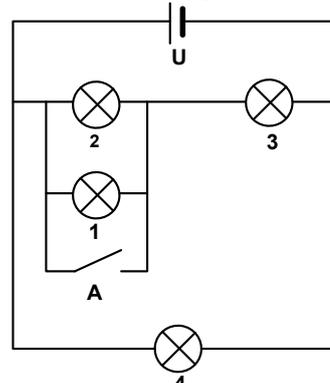
<p style="text-align: center;"><math>R_1 = 10 \Omega</math></p> <p style="text-align: center;"><math>R_1 = 5 \Omega</math></p> <p style="text-align: center;"><math>R_2 = 18 \Omega</math></p> <p style="text-align: center;"><math>R_3 = 47 \Omega</math></p>	<p style="text-align: center;"><math>R_1=R_2= 10 \Omega ; R_3= 5 \Omega, R_4=R_5=20 \Omega ;</math></p>
<p style="text-align: center;"><math>R_1=5 \Omega ; R_2=10 \Omega, R_3=15 \Omega ; R_4=20 \Omega ; R_5= 25 \Omega</math></p>	<p style="text-align: center;"><math>R_3= 2 \Omega \quad R_4= 3 \Omega</math></p> <p style="text-align: center;"><math>R_1= 2 \Omega</math></p> <p style="text-align: center;"><math>R_5= 2 \Omega</math></p> <p style="text-align: center;"><math>24 V \quad R_2= 3 \Omega</math></p>



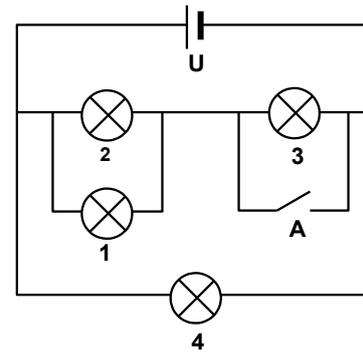
13. Les 4 ampoules sont identiques. (a) comparer les intensités du courant dans les 4 ampoules. (b) Les intensités sont-elles modifiées si on dévise l'ampoule 2 ? Si oui, dans quel sens ? (Justifier clairement les réponses).



14. Les 4 ampoules sont identiques. (a) Lorsque A est ouvert : comparer les intensités dans les 4 ampoules. (b) Les intensités sont-elles modifiées si on ferme A. Justifier clairement les réponses.



15. Les 4 ampoules sont identiques. (a) Lorsque A est fermé : comparer les intensités dans les 4 ampoules. (b) Les intensités sont-elles modifiées si on ouvre A ?

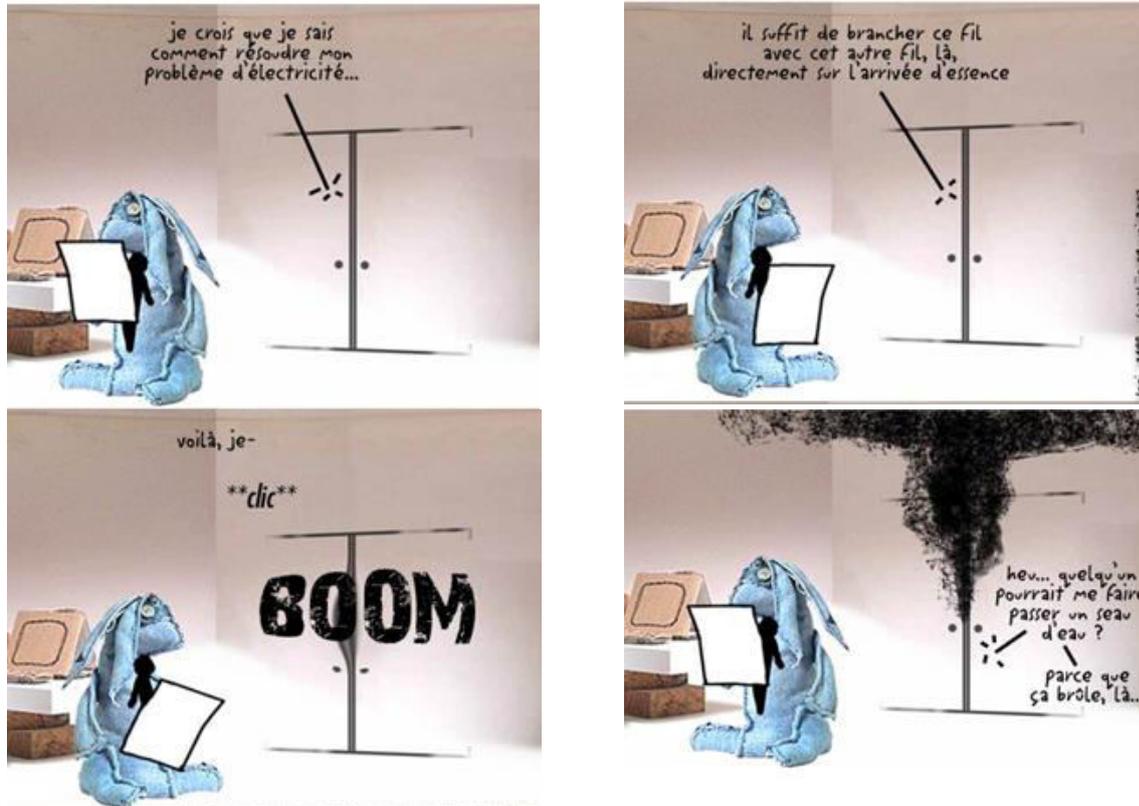


## 15.3 Exercices sur les générateurs

- 1) Quel est le courant débité par une dynamo de TEM 120 V et de résistance interne 0.05  $\Omega$ , lorsque la tension aux bornes tombe à 118 V ? (R : 40 A)
- 2) Une dynamo fournit une puissance extérieure de 3.45 kW et débite un courant de 30 A. Sa résistance interne est de 1/3  $\Omega$ . Quelle est sa TEM ? (R : 125 V)
- 3) Une dynamo de TEM 120 V débite 80 A. EN 5 heures elle a fourni 44 kWh au circuit extérieur. Trouver la tension aux bornes du générateur et sa résistance intérieure. (R : 110 V, 0.125  $\Omega$ )
- 4) Un générateur présente une tension de 100 V entre ses bornes à vide et 95 V lorsqu'il fournit 20 A. Trouver sa TEM et sa résistance interne. (R : 100 V ; 0.25  $\Omega$ )
- 5) Une dynamo fournit une puissance de 6 kW en débitant un courant de 15 A. La résistance interne est de 1.5  $\Omega$ . Quelle est la TEM de la dynamo ? (R : 422.5 V)

## 15.4 Exercices sur les récepteurs

- 1) Un récepteur de TCEM 30 V et de résistance 2  $\Omega$ , est parcouru par un courant de 5 A. Quelle est la tension appliquée au récepteur ? (R : 40 V)
- 2) Un moteur de résistance interne 0.5  $\Omega$  et de TCEM 238 V est alimenté par un générateur qui donne 250 V entre ses bornes. La ligne à une résistance de 0.3  $\Omega$ . Quel est le courant ? (R : 13.3 A)
- 3) Un petit moteur alimenté à 150 V présente en fonctionnement une TCEM de 140 V et absorbe 5 A. La résistance du circuit d'alimentation est négligeable. Quelle est la résistance interne du moteur ? (R : 2  $\Omega$ )
- 4) Un moteur, de résistance interne 1  $\Omega$ , absorbe 10 A sous 110 V. Quelle TCEM présente-t-il en fonctionnement ? Quel courant absorbe-t-il au démarrage ? (R : 100 V, 110 A)
- 5) Une batterie d'accumulateurs dont la TEM est de 23 V et dont la résistance interne est de 0.2  $\Omega$  est rechargé par une tension de 26 V. Quel est le courant de charge ? (R : 15 A)
- 6) Un moteur alimenté à 280 V a une résistance interne de 1.25  $\Omega$  et absorbe 50 A. Quelle TCEM présente-t-il ? Quel courant absorbe-t-il au démarrage ? (R : 217.5 V, 224 A)
- 7) Un récepteur présente une TCEM de 125 V en fonctionnement. Sa résistance interne est de 2.2  $\Omega$  et il absorbe 5 A. Quelle est la tension d'alimentation ? (R : 136 V)
- 8) Une batterie d'accumulateurs ayant une TEM de 10 V est rechargée par une tension de 14 V. Le courant de charge est 20 A. Quelle est la résistance interne de la batterie ? (R : 0.2  $\Omega$ )

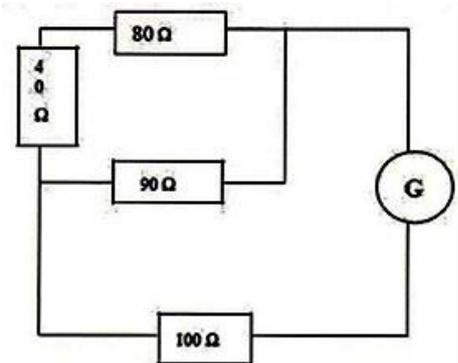
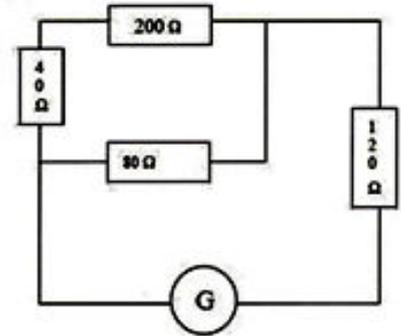


## 15.5 Exercices supplémentaires

1. Calculer la résistance d'une ampoule portant les indications :  $110\text{ V} - 40\text{ W}$ . Même question pour une seconde ampoule  $130\text{ V} - 100\text{ W}$ . ( $420\ \Omega - 170\ \Omega$ )
2. On branche un résistor de  $100\ \Omega$  sur un générateur de différence de potentiel de  $220\text{ V}$ . Calculer la quantité d'énergie thermique dissipée après 60 minutes de fonctionnement. Quel est le coût pour un KWh à  $0.17\ \text{€}$  ? ( $1.7\text{ MJ} - 0.08\ \text{€}$ )
3. Un fil de cuivre de résistance  $0.11\ \Omega$  est traversé par un courant de  $8.2\text{ A}$  pendant 12 heures. Calculer l'énergie dégagée. ( $0.32\text{ MJ}$ )
4. A une prise multiple, reliée au réseau  $220\text{ V}$ , sont branchés les trois appareils suivants : un radiateur de  $1000\text{ W}$ , un lampadaire de puissance  $100\text{ W}$  et un fer à repasser de résistance  $60\ \Omega$ . Quelle est l'intensité du courant traversant les fils reliant la prise multiple au réseau ? Si le réseau est protégé par un fusible de  $5\text{ A}$ , que se passe-t-il ? ( $8.7\text{ A}$ )
5. Combien d'ampoules de  $40\text{ W}$  peut-on brancher simultanément au maximum à un réseau  $220\text{ V}$  protégé par un fusible de  $10\text{ A}$  ? (55)
6. Une bouilloire électrique porte les indications :  $220\text{ volts}$ ,  $1000\text{ watts}$ . Sachant qu'il faut 10 minutes pour que cet appareil en fonctionnement porte à ébullition un litre d'eau prise à  $20^\circ\text{C}$ , déterminer son rendement. (56%). Chaleur massique de l'eau :  $4.18\text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$
7. On voudrait chauffer une pièce à l'aide d'un radiateur électrique d'une puissance de  $2.2\text{ kW}$ , fonctionnant sous une différence de potentiel de  $220\text{ volts}$ . Déterminer :
  - a. L'intensité du courant qui circule dans l'appareil, ainsi que la résistance de celui-ci.
  - b. La quantité de chaleur qui s'y dégage en une heure et l'élévation de température qu'il ferait subir à  $1\text{ m}^3$  d'eau ( $10\text{ A} - 22\ \Omega - 7.92\text{ MJ} - 1.9^\circ\text{C}$ )
8. Pour réaliser la résistance d'un radiateur électrique devant fonctionner sous une différence de potentiel de  $130\text{ volts}$ , on compte employer un fil métallique de  $30\text{ m}$  de longueur. La résistivité de l'alliage utilisé vaut  $80 \times 10^{-8}\ \Omega\text{ m}$  et l'on désire que l'intensité maximale du courant dans cette résistance ne dépasse pas  $10\text{ A}$ . Déterminer le diamètre du fil qu'il faudrait employer.

9. Le conducteur aérien d'une ligne de tramway est un fil de cuivre de 5 km de longueur. Déterminer son diamètre pour que sa résistance électrique vaille  $2.2 \Omega$  (7 mm). Prendre  $\rho = 1.7 \times 10^{-6} \Omega m$
10. Un tronçon de circuit comporte deux résistances de 200 et 300  $\Omega$  associées en parallèle. On le soumet à une différence de potentiel de 220 volts.
- Que vaut l'intensité du courant dans chacune des branches ?
  - Déterminer la valeur de la résistance qu'il faudrait placer en série avec le groupement précédent pour que l'intensité du courant principal vaille 1.1 A ?
  - Que vaut la différence de potentiel aux bornes de la résistance additionnelle, ainsi qu'aux bornes du groupement des deux résistances en parallèle ?
11. Dans un circuit, on connecte en série trois résistances valant respectivement 5, 7 et 8  $\Omega$ . On désire réaliser dans le circuit principal une intensité de courant de 5 A.
- Déterminer la mesure de la différence de potentiel à appliquer aux extrémités du groupement.
  - Déterminer la mesure de la résistance unique qui, vis-à-vis de la loi d'Ohm, qui jouerait le même rôle que l'ensemble.
12. Dans un circuit, on connecte en parallèle 3 résistances valant respectivement 2, 4 et 10  $\Omega$ . On désire réaliser dans le circuit principal, une intensité de courant valant 8.5 A.
- Déterminer la résistance unique qui, vis-à-vis de la loi d'Ohm, jouerait le même rôle que l'ensemble.
  - Déterminer la différence de potentiel qui doit être appliquée aux extrémités du groupement.
  - Déterminer l'intensité de chacun des courants dérivés.  
(1.17  $\Omega$  – 10 V – 5 ; 2.5 ; 1 A)
13. Le conducteur aérien d'une ligne de tramway est un fil de cuivre de 7 mm de diamètre et de 4 km de longueur. Le conducteur de retour est un rail d'acier de 50 cm<sup>2</sup> de section. L'intensité du courant qui parcourt la ligne vaut 50 ampères. Déterminer la différence de potentiel entre les extrémités de chacun des conducteurs. (88 V – 7.2 V).  $\rho_{\text{cuivre}} = 1.7 \times 10^{-8} \Omega m$ .  $\rho_{\text{acier}} = 18 \times 10^{-8} \Omega m$ .
14. Un fer électrique ayant une résistance de 25  $\Omega$  est placé en parallèle avec des lampes à incandescence dont la résistance équivalente vaut 15  $\Omega$ . Le tout est branché sur le compteur par l'intermédiaire d'un fusible. Sachant que la différence de potentielle utilisable est de 120 V, déterminer l'intensité maximale que doit supporter le fusible pour que le circuit ne soit pas coupé quand le fer et les lampes fonctionnent simultanément. (12.8 A).
15. Un récepteur calorifique est conçu pour fonctionner avec une intensité de courant de 5 A, sous une différence de potentiel de 130 V. On désire l'employer dans un lieu où la différence de potentiel utilisable est de 220 V. Quelle est la valeur de la résistance qu'il faut placer en série avec lui, pour ne pas dépasser l'intensité de courant prévue initialement ? (18  $\Omega$ )
16. Une habitation est dotée d'un compteur électrique pourvu d'un fusible de 5 A. La différence de potentiel utilisable entre ses bornes est de 220 V. Déterminer la puissance maximale dont on dispose dans un circuit branché entre ses bornes. On fait fonctionner un aspirateur de 350 W. Combien de lampes de 60 W peut-on utiliser simultanément ? Qu'arriverait-il si l'on branchait simultanément sur ce circuit l'aspirateur et un réchaud de 1 kW ? (1100 W ; 12 ; I = 6.1 A)
17. Sur le circuit sous 230 V d'une cave qu'on a protégé par un fusible de 16 A, on peut brancher en parallèle 3 appareils électriques : un lave-linge de 3600 W, un frigo de 200 W et une ampoule à incandescence de 881  $\Omega$ .
- Faites un schéma du circuit. Où doit être placé le fusible ?
  - Donnez la résistance de chaque appareil. Lequel est traversé par le plus fort courant ?
  - Quelle est la résistance totale du circuit si tous les appareils étaient branchés simultanément ?
  - Dites, en justifiant votre réponse, si le fusible est suffisant pour cette cave dans tous les cas d'utilisation des appareils ou bien dans quel cas il risquerait de sauter suite à une surchauffe due à une surintensité.  
(14.7  $\Omega$  – 265  $\Omega$  – 881  $\Omega$  ; lampe ; 13.7  $\Omega$  ; frigo et lave-linge ne peuvent fonctionner ensemble)
18. Une bouilloire électrique est constituée par une grosse résistance métallique de 29.4  $\Omega$  qui chauffe l'eau pas effet joule. La capacité de la bouilloire est de 2 litres. On la branche directement sur le réseau électrique domestique sous 230 V.
- Quelle est l'intensité du courant qui la traverse et la puissance de cette bouilloire ?
  - Quel temps met-elle pour faire bouillir  $\frac{3}{4}$  de litre d'eau initialement à 15°C sachant qu'un gramme d'eau nécessite 4.186 J pour s'élever de un degré (C'est la définition de la calorie !) ? tenez compte d'un rendement énergétique de 80% ; les pertes en chaleur vers l'extérieur sont en effet non négligeables dans ce genre d'appareil, on le sent lorsqu'on prend en main la bouilloire !

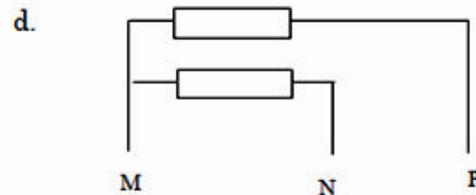
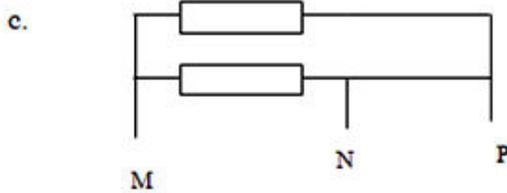
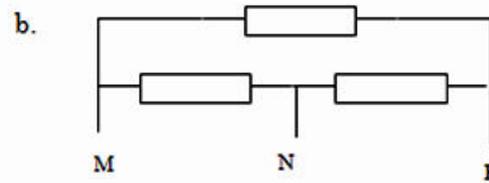
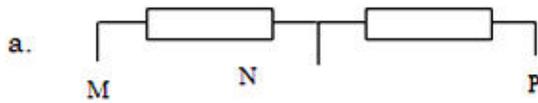
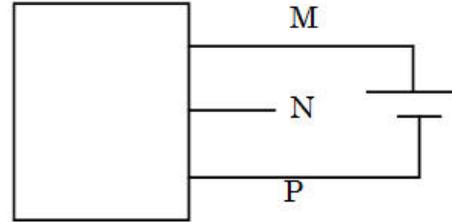
- c. Si on utilise cette bouilloire à raison de 3 litres d'eau à faire bouillir par jour, quel est le coût en € à la fin d'une année d'utilisation. Comptez 0.18 € par kilowattheure ? (7.82 A ; 1799 W ; 185 s ; 24.3 €)
19. Dans le circuit ci-contre la tension fournie par le générateur est de 9 V.
- Calculez l'intensité totale de courant qui est fournie par le générateur. (0.05 A)
  - Quelle est la tension électrique aux bornes du récepteur de  $40 \Omega$  ? (3 V)
  - Quel est l'intensité de courant qui traverse le récepteur de  $80 \Omega$  ? (0.0375 A)
20. Vrai ou faux ?
- Si la longueur d'un fil conducteur augmente, sa résistance diminue.
  - Si la section d'un fil conducteur diminue, sa résistivité augmente.
  - La résistance équivalente à deux ampoules identiques mises en série vaut la moitié de la résistance de chacune des ampoules.
  - Sous une même tension électrique, si la résistance d'un récepteur augmente, l'intensité du courant traversant le récepteur va augmenter.
  - Si sous une même tension électrique, la résistance d'un récepteur augmente, la puissance électrique consommée par le récepteur va augmenter.
  - Sous 220 V, si on place deux récepteurs identiques en parallèle au lieu de les placer en série, l'intensité totale va augmenter.
  - Il faut plus d'énergie pour augmenter de  $5^\circ\text{C}$  la température de 1 litre d'eau que pour  $1 \text{ m}^3$  d'air.
  - L'énergie totale fournie par un résistor double s'il est traversé sous 220 V par une intensité de courant électrique deux fois plus importante. ( F F F F F V V V )
21. Soit un fil de Nickel-Chrome de résistivité égale à  $100 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$  et de  $0.5 \text{ mm}^2$ .
- Quelle doit être sa longueur pour qu'alimenté par un générateur de 12 V, il soit traversé par une intensité de courant électrique de 2.50 A ? (2.4 m)
  - Quelle est la puissance électrique dissipée par effet joule dans ce fil ? (30 W)
22. Une grosse résistance chauffante de 7.6 kW de puissance fonctionne sous 380 V.
- Quelle est l'intensité du courant qui la traverse ? (20 A)
  - Quelle est la valeur de sa résistance ? (19  $\Omega$ )
  - Déterminez la quantité d'énergie qui serait nécessaire à faire chauffer de  $15^\circ\text{C}$  à  $45^\circ\text{C}$  la température d'une cuve de 500 litres d'eau ? (62.7 MJ)
  - A partir de votre réponse en c), déterminez pendant combien de temps il faut alimenter en électricité la grosse résistance chauffante pour parvenir à chauffer l'eau de la cuve ? (2.29 h et 2.61 €)
23. Dans le circuit ci-contre la tension fournie par le générateur est de 220 V.
- En calculant la résistance totale de l'ensemble des composants du circuit, calculez l'intensité totale de courant qui est fournie par le générateur. (1.45 A)
  - Quelle est la tension électrique aux bornes du récepteur de 90 W ? (74.7 V)
  - Quel est l'intensité de courant qui traverse le récepteur de 80 W ? (0.62 A)



## 15.6 Olympiades de physique

### 1. Qualifications cinquième 2002

1) Une boîte noire contient deux ou trois résistors identiques de résistance inconnue et trois bornes M, N et P. Vous branchez une pile entre les bornes M et P et vous mesurez les tensions  $V_1$  entre les bornes M et N et  $V_2$  entre les bornes N et P (voir schéma ci-contre). Vous trouvez les valeurs suivantes :  $V_1 = 2 \text{ V}$  et  $V_2 = 4 \text{ V}$ . Un schéma de branchement envisageable est



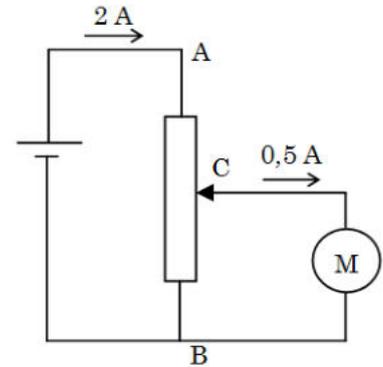
e : Aucun de ces schémas ne convient

(Réponse : e)

2) Un potentiomètre dont la résistance totale (entre A et B) est  $10 \Omega$  fait partie d'un circuit électrique alimentant le moteur miniature M. La tension d'alimentation du moteur (mesurée entre C et B) est  $3 \text{ V}$ . L'intensité du courant entrant dans le potentiomètre est  $2 \text{ A}$  et celle du courant de sortie est  $0,5 \text{ A}$ . Quelle est la valeur de la puissance électrique consommée par ce potentiomètre (cochez la bonne réponse) ?

- a.  $0,9 \text{ W}$     b.  $4,5 \text{ W}$     c.  $32 \text{ W}$     d.  $36,5 \text{ W}$

(Réponse : d)



### Problème sixième, 2002

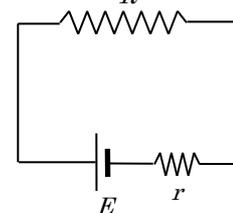
Une batterie de tension électromotrice  $E$  et de résistance interne  $r$  débite du courant continu dans un résistor  $R$ . Pour quelle valeur de  $R$ , la puissance dissipée dans  $R$  est-elle maximale ?

**Solution**

Formules :

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

$$U = E - rI \Rightarrow I = \frac{E - U}{r}.$$



$$\frac{U}{R} = \frac{E - U}{r} \Rightarrow U = E \frac{R}{R + r}.$$

La puissance dissipée dans  $R$  :

$$\frac{U^2}{R} = E^2 \frac{R}{(R + r)^2}$$

est maximum si sa dérivée par rapport à  $R$  est nulle.

$$\frac{E^2(R + r)^2 - E^2 R 2(R + r)}{(R + r)^4} = 0.$$

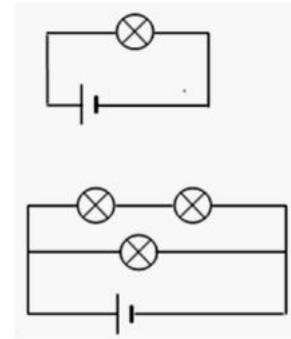
d'où  $R + r - 2R = 0$ .

On déduit  $R = r$

### 3) Qualifications sixième 2003

Les circuits électriques ci-contre comprennent une batterie et une ou plusieurs lampes. Les lampes ont des propriétés identiques, indépendantes de la température. La résistance interne de la batterie est négligeable. Si la puissance consommée par la lampe du premier circuit est 36 W, quelle est la puissance totale consommée par les trois lampes du deuxième circuit ?

a. 4 W b. 12 W c. 36 W d. 54 W e. 72 W f. 108 W (Réponse : d)

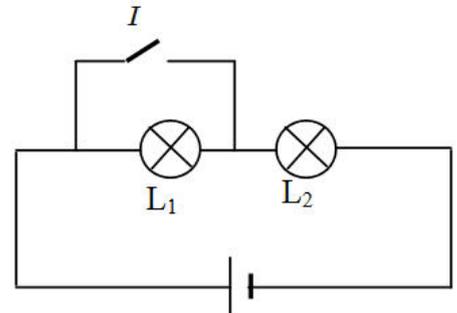


### 4) Qualifications sixième 2003

Considérez le circuit électrique schématisé ci-contre : lorsque l'interrupteur  $I$  est fermé ( $I$  est « ON »),  $L_1$  est éteinte et  $L_2$  allumée. Lorsqu'on ouvre  $I$  ( $I$  est « OFF »),  $L_1$  s'allume et  $L_2$  est pratiquement éteinte. Que peut-on affirmer quant aux résistances (supposées constantes) des deux lampes ?

- g.  $R_1 > R_2$ .
- h.  $R_1 < R_2$ .
- i.  $R_1 = R_2$ .
- j. On ne peut rien en conclure de particulier.

(Réponse : d)



### 5) Qualifications sixième 2004

Trois résistances sont branchées en série :  $R_1 = 10 \Omega$ ,  $R_2 = 2 \Omega$  et  $R_3 = 8 \Omega$ . Quelle est la tension électrique maximale qu'on peut appliquer à ce groupe de résistances sans en détruire aucune, sachant que  $R_1$  supporte une puissance maximale de 2 W, que  $R_2$  supporte 1 W et que  $R_3$  ne supporte que 8 W ?

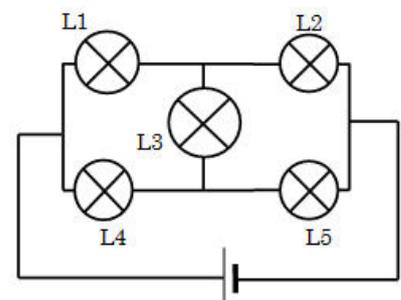
- k. 0,55 V
- b. 8.9 V
- c. 13.9 V
- d. 14.8 V

(Réponse : a)

### 6) Qualifications sixième 2004

Cinq petites lampes identiques en bon état de fonctionnement sont connectées comme indiqué sur le schéma ci-contre. On constate que la lampe  $L_2$  luit normalement. Quelles sont, parmi les réponses suivantes, celles qui correspondent à des affirmations correctes ?

- l.  $L_1$  luit moins fort que  $L_2$ .



- m.  $L_1$  luit plus fort que  $L_2$ .
- n.  $L_4$  luit aussi fort que  $L_2$ .
- o.  $L_3$  est éteinte.
- p.  $L_3$  luit plus fort que  $L_5$ .

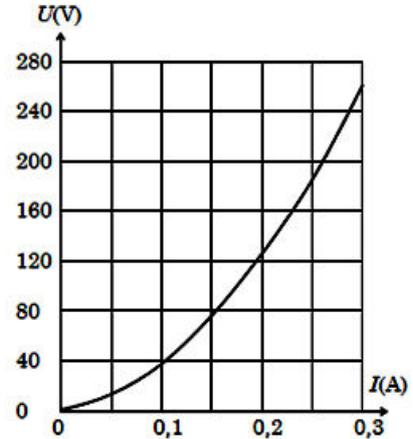
Remarque : l'ensemble des réponses doit être correct pour recevoir 5 points.

(Réponse : c et d)

**7) Qualifications sixième 2004**

Le graphique ci-contre représente la tension aux bornes d'une lampe (220 V, 60 W) en fonction de l'intensité du courant qui la traverse. On connecte deux lampes de ce type en série et le groupement est alimenté en 220 V. Parmi les réponses suivantes, laquelle correspond le mieux à la puissance électrique totale consommée par ces deux lampes ?

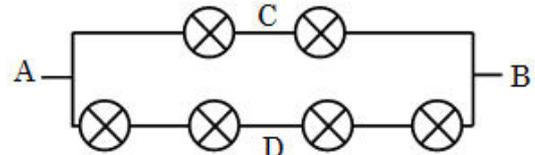
- q. 10 W. b. 20 W. c. 30 W. d. 40 W. e. 60 W. f. 120 W
- (Réponse : d)



**8) Qualifications sixième 2005**

1) Le tronçon de circuit schématisé ci-contre est soumis à une différence de potentiel électrique constante entre A et B. Il comporte 6 lampes identiques. On relie les points C et D par un fil métallique de résistance négligeable. Que se passe-t-il ?

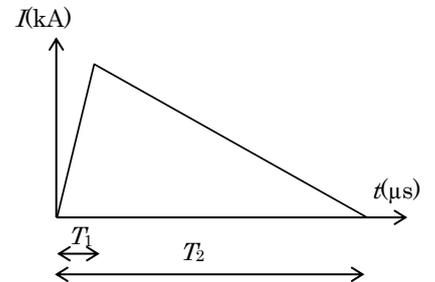
- r. Un court-circuit se produit et toutes les lampes s'éteignent.
  - s. Seules les lampes situées à gauche de C et D s'éteignent.
  - t. Seules les lampes situées à droite de C et D s'éteignent.
  - u. L'éclairement des lampes ne subit aucune modification.
- (Réponse : d)



2) L'intensité du courant électrique d'une décharge de foudre varie au cours du temps comme le montre le schéma ci-contre. La valeur maximale de l'intensité est souvent de l'ordre de 35 kA. La durée  $T_1$  de front = 22  $\mu$ s et la durée  $T_2$  de l'impulsion = 230  $\mu$ s. Quelle est, dans ce cas, la charge électrique totale transférée entre le sol et le nuage au cours de la décharge ?

- v. 0,4 C.
- w. 0,8 C.
- x. 3,6 C.
- y. 4 C.
- z. 8 C.

(R : c)

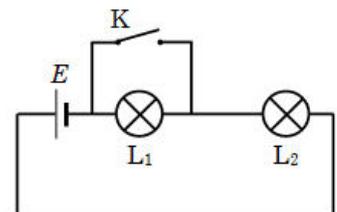


**8) Qualifications sixième 2006**

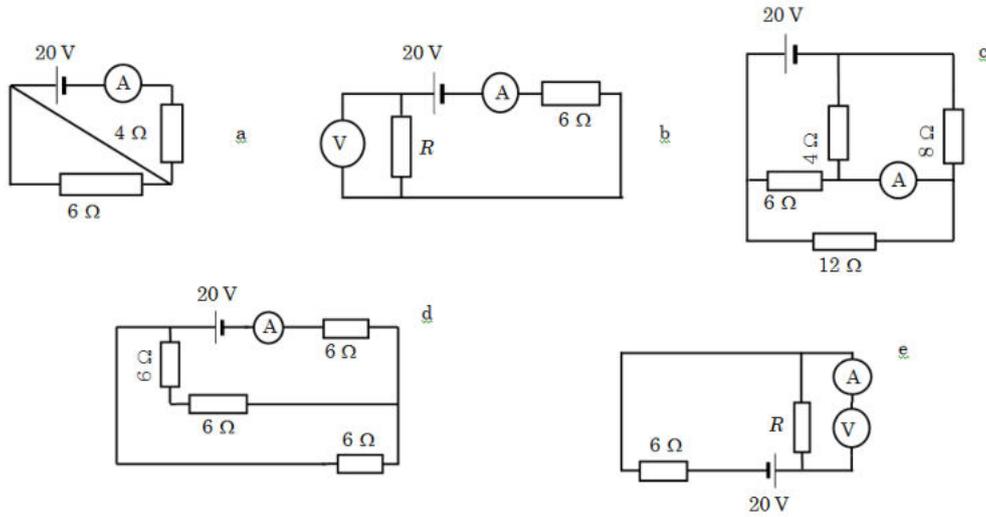
1) Dans le circuit électrique schématisé ci-contre où la résistance interne du générateur est négligeable, on observe que  $L_1$  s'éteint et  $L_2$  s'allume lorsqu'on ferme l'interrupteur K. Par contre, si on ouvre ce même interrupteur,  $L_1$  s'allume et  $L_2$  s'éteint. Comparez les résistances de  $L_1$  et  $L_2$ .

- a.  $R_1 > R_2$ . b.  $R_1 < R_2$ . c.  $R_1 = R_2$ . d. Impossible de conclure.
- f.  $R_1 = 0$ .

(Réponse : d)



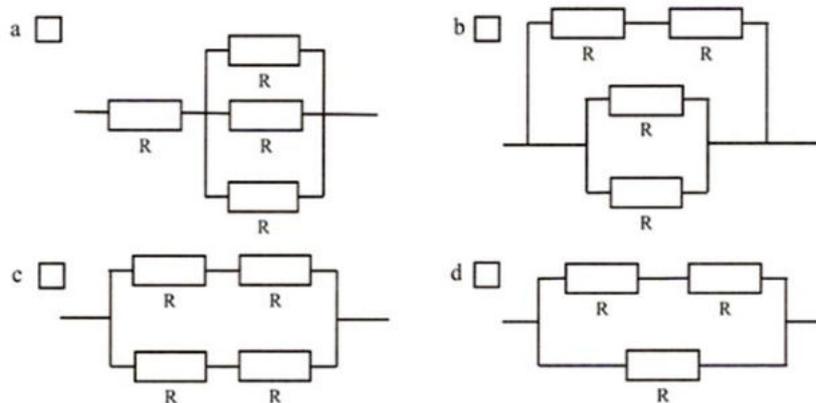
2) Déterminez l'intensité  $I$  du courant dans l'ampèremètre dans chacun des 5 circuits suivants. Cet ampèremètre n'a aucune résistance. Le voltmètre a une résistance infinie et indique 8 V (circuit b et e).  $R$  est inconnue (circuits b et e). Les réponses sont jugées correctes si elles ne sont pas éloignées de plus de 10 % des réponses exactes.



(Réponse : 5 A, 2 A, 0 A, 2 A, 0 A)

### 10) Qualifications sixième 2008

Quelle est la partie de circuit électrique qui possède une résistance  $\frac{4}{3} R$  sachant que toutes les résistances sont identiques et de valeur  $R$  ?



(Réponse : a)



# Electromagnétisme

Le **magnétisme** est un phénomène physique, par lequel se manifestent des forces attractives ou répulsives d'un objet sur un autre, ou avec des charges électriques en mouvement. Ces objets, dits magnétisables, sont susceptibles de réagir au champ magnétique par une réaction d'orientation et/ou de déplacement dépendante de la force et de l'orientation. Cette force s'effectue par l'intermédiaire du champ magnétique, et est produite par des charges en mouvement ou des aimants.



Lévitacion  
magnétique

## 1. Savoirs

A la fin de ce chapitre, vous devrez avoir acquis les **savoirs** suivants

- Expliquer les caractéristiques des aimants, définir les pôles.
- Décrire
  - Champ magnétique des aimants et des courants.
  - Champ magnétique terrestre.
- Donner l'interprétation d'Ampère du magnétisme des aimants permanents en termes de courants électriques microscopiques.
- Décrire l'interaction courant – courant.
- Définir l'ampère, unité de base du SI.
- Décrire la force de Laplace et expliquer des applications : un exemple, le moteur électrique.
- Force de Lorentz : un exemple, déviation d'une particule chargée dans un champ magnétique.
- Tension induite, loi de Lenz.
- Décrire et expliquer les courants de Foucault.
- Donner les caractéristiques du courant alternatif :
  - production.
  - effets.
  - grandeurs efficaces.
  - impédance d'un condensateur et d'une bobine.
- Expliquer le transformateur, et le transport de l'énergie électrique.

## 2. Compétences

Vous devrez avoir acquis les **compétences** suivantes

- Représenter en un point le vecteur champ magnétique créé par un aimant et par un courant dans un fil rectiligne, une spire, un solénoïde.
- Déterminer les caractéristiques de la force subie par un conducteur traversé par un courant et placé dans un champ magnétique.
- Décrire le champ magnétique terrestre. En donner l'ordre de grandeur et un modèle explicatif.
- Prévoir le mouvement d'une charge électrique dans un champ magnétique.
- Expliquer quelques utilisations des électroaimants.
- Associer l'existence d'un champ magnétique à un mouvement de charges électriques.
- Expliquer les principes de fonctionnement d'un moteur électrique et d'un alternateur.

- Justifier les avantages des tensions alternatives.
- Expliquer le comportement d'un condensateur et d'une bobine soumis à une tension alternative.
- Déterminer la valeur et le sens des courants induits.
- Expliquer des applications des courants de Foucault.
- Expliquer le principe de fonctionnement d'au moins un appareil utilisant les phénomènes d'induction de courant.

## 3. Magnétisme

Le magnétisme est la partie du cours de physique dans laquelle on étudie les aimants.

### 3.1 Les aimants

#### 3.1.1 Sortes d'aimants

##### 3.1.1.1 Aimant naturel

C'est la magnétite (minerai de fer  $Fe_3O_4$ ) (Fig. 33-01) qui possède la propriété d'attirer la limaille de fer. La magnétite est un aimant naturel. Cette roche fut trouvée pour la première fois près de la ville de Magnésia en Asie Mineure d'où le nom de magnétisme.



Figure 33-01

##### 3.1.1.2 Aimant artificiel

On utilise des aimants artificiels fabriqués pour la plupart en acier et auxquels, on a communiqué cette propriété de magnétisme par un procédé électrique. (Voir autre partie de ce cours)

Ils peuvent avoir plusieurs formes différentes :

Aiguille de boussole, barreau rectiligne, aimant en forme de U (Fig. 33-02)

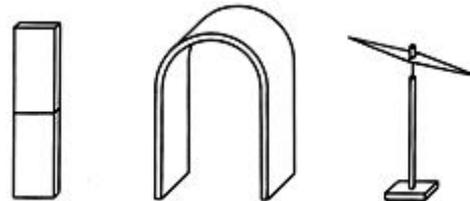


Figure 33-02

## 3.2 Les phénomènes magnétiques

### 3.2.1 Expériences

1. Approchons un aimant de certains objets : bois, pièces de monnaie, clefs, cuivre, clou d'acier, limaille de fer,...

Il existe :

*des matériaux non magnétiques* : aucune attraction par un aimant (papier, bois, plomb, aluminium, plastiques,...

*des matériaux magnétiques* : attraction par un aimant (fer, fonte, acier,...) (Fig. 33-3)

**Un aimant exerce une force attractive à distance sur les matériaux magnétiques.**

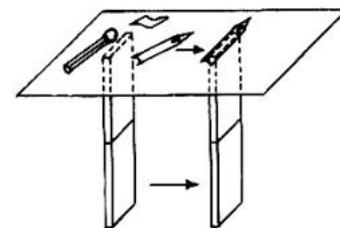


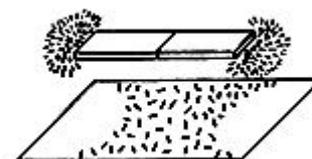
Figure 33-03

2. **L'attraction magnétique des corps se manifeste essentiellement aux extrémités appelées pôles de l'aimant.**

(Fig. 33-04)



Figure 33-04 (a), (b)



3. *Toute aiguille aimantée capable de bouger, s'oriente toujours dans la même direction : celle du Sud Nord géographique.*

Par convention : on appelle

*pôle N, le pôle pointant vers le N géographique*  
*pôle S, le pôle pointant vers le S géographique*

Figure 33-05

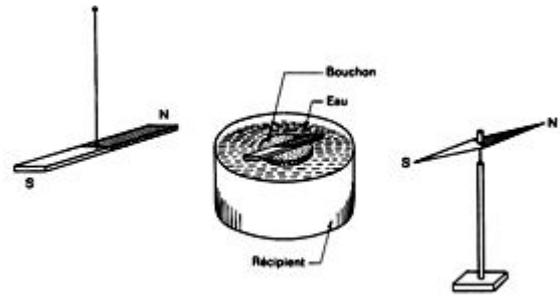


Figure 33-05

L'angle entre l'orientation de l'aiguille et celle de la direction Sud Nord géographique est d'approximativement de 5°. Cet angle est appelé **la déclinaison magnétique** (Fig. 33-06)

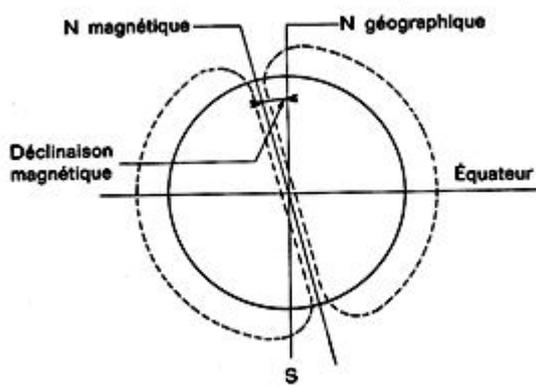


Figure 33-06

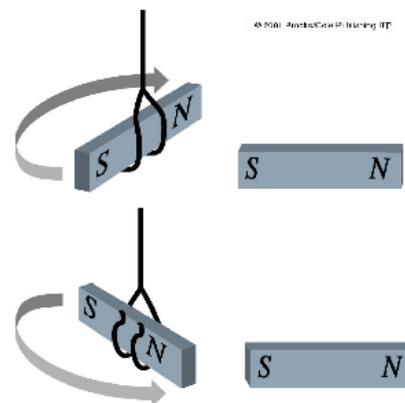


Figure 33-07

#### 4. Interactions entre pôles

Deux pôles de même nom se repoussent, deux pôles de noms contraires s'attirent. (Fig. 33-07)

#### 5. Bris d'un aimant.

*Il est impossible d'isoler un pôle d'aimant. Il n'existe donc pas de monopôle magnétique alors qu'en électricité, on pouvait séparer des charges positives et des charges négatives (Fig. 33.08)*

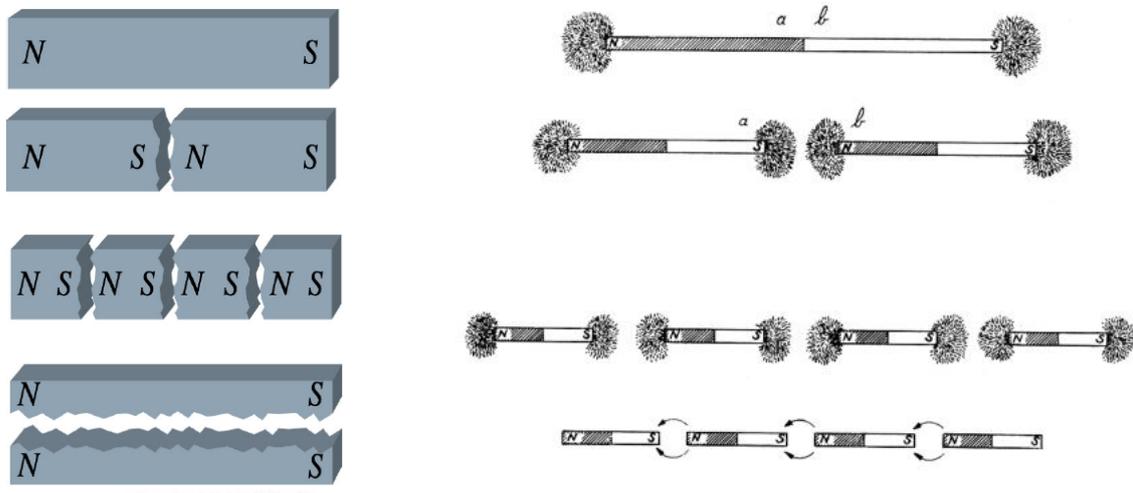


Figure 33-08 (a)(b)

## 6. Conservation des aimants

Il faut relier les aimants comme le montre la figure, par des morceaux de fer afin de fermer le circuit magnétiquement (Fig. 33.09)

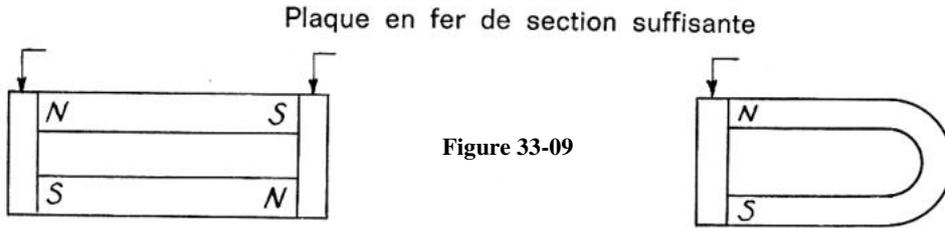


Figure 33-09

## 3.3 Champ magnétique B

### 3.3.1 Notion de champ magnétique

Plaçons des boussoles dans l'espace : elles s'orientent toutes dans la direction géographique S-N (Fig. 33-10)

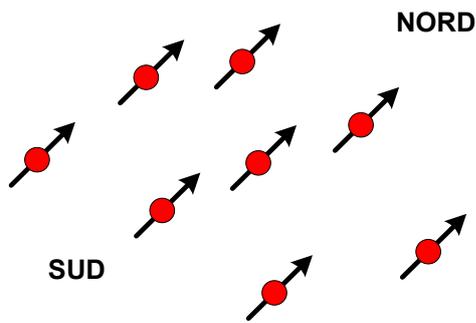


Figure 33-10

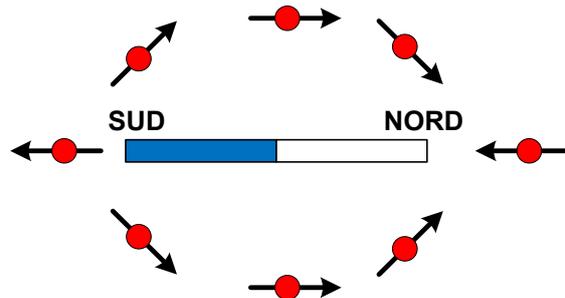


Figure 33-11

Plaçons les boussoles au voisinage d'un aimant droit. (Fig. 33-11) En chaque point de l'espace, la boussole s'oriente différemment.

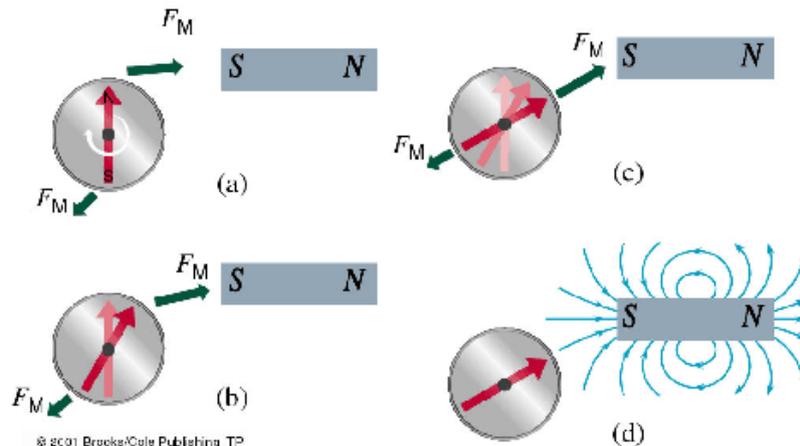


Figure 33-12 (a), (b), (c), (d)  
Un aimant exerce sur une aiguille aimantée une force. Si l'aiguille est en rotation libre, elle tourne jusqu'à une position d'équilibre, dans laquelle ce moment est nul.

*Par son magnétisme, l'aimant modifie donc les propriétés de l'espace qui l'entoure en créant dans cet espace des forces magnétiques*

### 3.3.2 Définition

On dit qu'il existe au voisinage de l'aimant un champ magnétique si une boussole tend à s'y orienter

Pour caractériser le champ magnétique, on définit le vecteur champ magnétique (Fig. 33-13).

**Direction :** Diagonale de l'aiguille aimantée placée au point considéré ; c'est aussi la direction de la tangente à la ligne d'induction magnétique.

**Sens :** Celui allant du Sud vers le Nord par l'intérieur de l'aiguille aimantée.  
C'est en fait le même sens que celui des lignes d'induction.

**Intensité :** Fonction de l'aimant utilisé et de la position du point. Son unité est le Tesla ( T ).

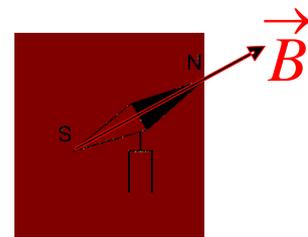


Figure 33-13

### 3.3.3 Ligne de champ magnétique

Plaçons autour d'une tige aimantée une série de petites boussoles. (Fig. 33-14). Les boussoles vont s'orientées en fonction du champ magnétique qu'elles subissent. La direction indiquée par les boussoles est la direction de  $\vec{B}$ . i nous considérons la ligne qui en chacun de ses points est tangente au vecteur induction magnétique  $\vec{B}$ , nous définissons alors les lignes de champ magnétique.

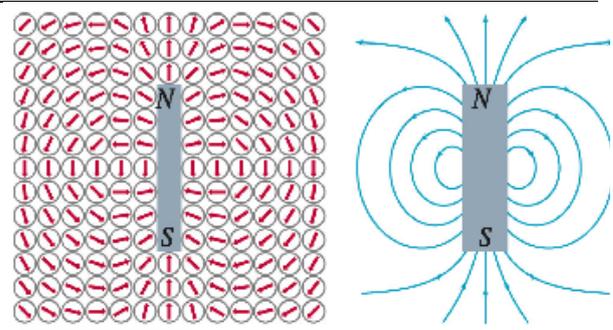


Figure 33-14

Il est très important de comprendre que le dessin ne montre que les lignes de champ dans le plan. En réalité, le champ se trouve dans l'espace à trois dimensions. Les lignes de champ forment des boucles refermées sur elles-mêmes. De plus, elles ne se croisent pas. (Fig. 33-15)

*Par convention, les lignes de champs, à l'extérieur de l'aimant, sont orientées du nord vers le sud. (Fig. 33-15(b)). Autrement dit, à l'intérieur de l'aimant, les lignes sont orientées du sud au nord*

Les aimants en forme de fer à cheval (ou dit de forme en U) permettent de réaliser des champs uniformes. (Fig. 33-16)

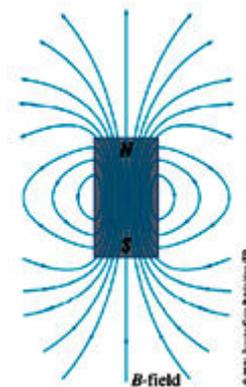


Figure 33-15 (a)

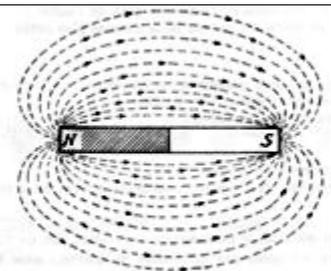
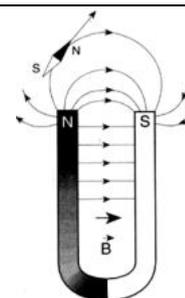


Figure 33-15 (a)

**Figure 33-16 :** Un aimant en forme de fer à cheval permet de réaliser dans l'entrefer un champ magnétique uniforme, c'est-à-dire de même direction, de même sens et de même intensité.

Attention : on parle souvent du champ à « l'intérieur » d'un aimant en U, il faut comprendre qu'il s'agit du champ dans l'entrefer et non pas dans la tige aimantée proprement dite.



**TABEAU 21.1 Champs magnétiques**

Source	Champ (T)
Noyau atomique (à sa surface)	$10^{12}$
Étoile à neutrons (à sa surface)	$\approx 10^8$
Le champ le plus intense produit en laboratoire	
compression explosive ( $\approx 10^{-6}$ s)	$1,5 \times 10^3$
bobines à impulsion ( $\approx 10^{-3}$ s)	100
constant (par courant continu dans un aimant supraconducteur, 1993, MIT)	37,2
constant (courant continu à température ambiante)	23,5
Sans effets aigus sur les bactéries, les souris, ou les insectes de fruits	14
Grand électroaimant de laboratoire	5
Taches solaires (à l'intérieur)	0,3
Limite d'exposition humaine (sur tout le corps, continu, pour des minutes)	$\approx 0,2$
Petit aimant de céramique (à proximité)	$\approx 0,02$
Petite tige aimantée (près des pôles)	$10^{-2}$
Soleil (à sa surface)	$10^{-2}$
Sèche cheveux (60 Hz, à proximité)	$1 \times 10^{-3} - 2,5 \times 10^{-3}$
Ouvre-boîtes électrique (60 Hz, à proximité)	$0,5 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-3}$
Jupiter (aux pôles)	$8 \times 10^{-4}$
Mixer (60 Hz, à proximité)	$10^{-4} - 0,5 \times 10^{-3}$
Terre (à sa surface)	$0,5 \times 10^{-4}$
Téléviseur couleur (60 Hz, à proximité)	$10^{-4}$
Ligne haute tension (maximum sous 765 kV, 4 kA)	$\approx 0,5 \times 10^{-4}$
Grille-pain (60 Hz, à proximité)	$0,1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-4}$
Lumière solaire (quadratique moyen)	$3 \times 10^{-6}$
Réfrigérateur (60 Hz, à proximité)	$10^{-6}$
Mercure (à la surface de la planète)	$2 \times 10^{-7}$
Corps humain (produit par le)	$\approx 3 \times 10^{-10}$
Espace interstellaire	$\approx 10^{-10}$
Région protégée par un blindage (plus faible champ mesuré)	$1,6 \times 10^{-14}$

Le tableau ci-contre donne quelques ordres de grandeur des champs magnétiques que l'on rencontre. Par exemple, sur le champ magnétique terrestre est d'environ  $0,5 \cdot 10^{-5} T$ .

### 3.3.4 Spectre magnétique

*Ensemble des lignes de champ magnétique.  
(Matérialisé par la limaille de fer) (Fig. 3 3-17)*

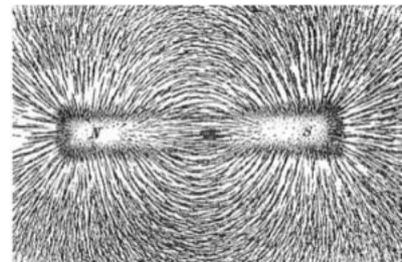


Figure 33-17

### 3.3.5 Champ magnétique uniforme

Entre les branches d'un aimant en U, les vecteurs  $B$  sont // et partout identiques. On dit que le champ est uniforme. (Fig. 3-16)

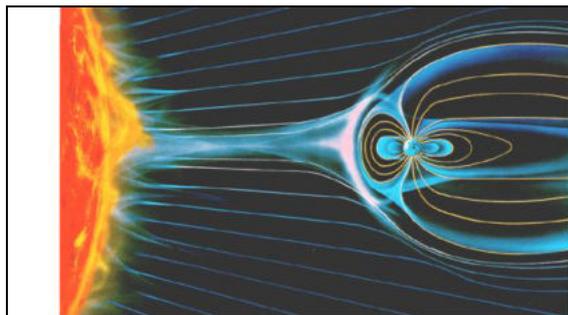
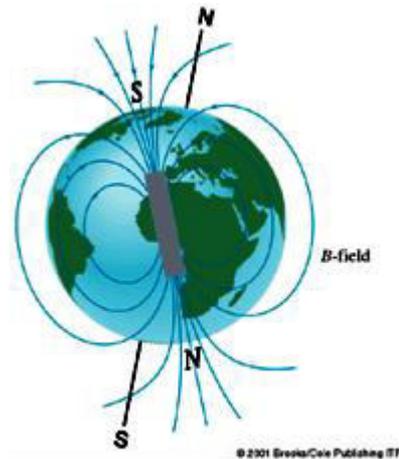
### 3.3.6 Champ magnétique terrestre

Une boussole au voisinage de la Terre subit une influence de type magnétique.

*La Terre produit donc un champ magnétique dans son voisinage et elle se comporte comme un énorme aimant droit.*

C'est la pointe N de la boussole qui point vers le Nord géographique auquel correspond donc un **pôle Sud magnétique**. De même, c'est la pointe Sud de la boussole qui pointe vers le Sud géographique auquel il correspond un **pôle Nord magnétique**. (Fig. 33-18)

Le champ magnétique terrestre nous protège des radiations dangereuses venant du Soleil. (Fig. 33-19,20,21)

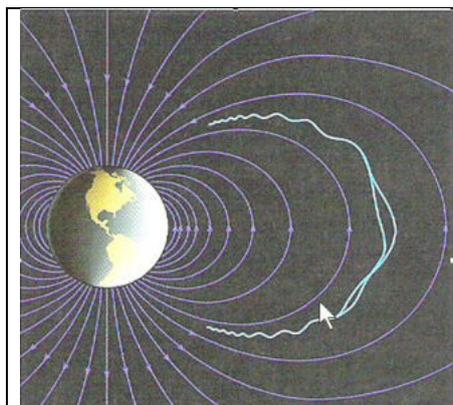


Les particules chargées du vent solaire sont amenées aux pôles. Les collisions de ces particules et les molécules de la haute atmosphère produisent de la lumière, ce sont les aurores boréales (au nord) et australes (au sud).

**Figure 33-19**

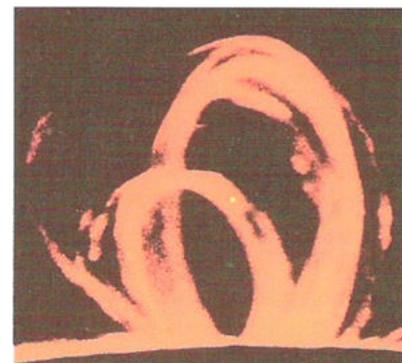


**Figure 33-20 : Aurore boréale**



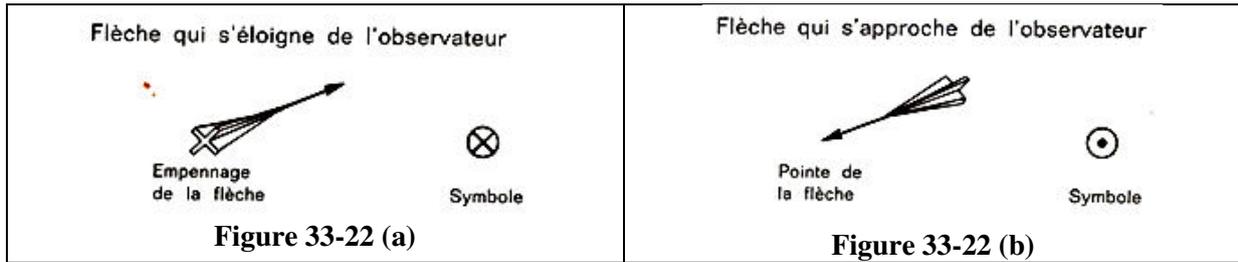
**Figure 33-20 :** Les protons et les électrons de l'espace sont confinés par le champ magnétique terrestre

**Figure 33-21 :** La forme de ces éruptions solaires est une preuve de l'existence du champ magnétique solaire



### 3.3.7 Remarque sur la représentation d'un vecteur

Lorsque plusieurs vecteurs sont à représenter sur un schéma, certains seront représentés dans le plan et d'autres se retrouveront  $\perp$  au plan. Pour ces derniers, il existe des conventions de représentation. (Fig. 33-22)

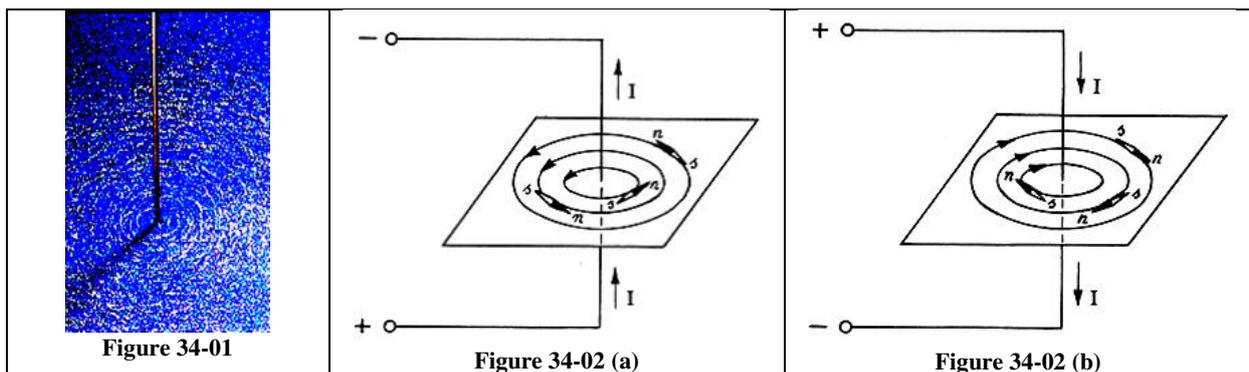


## 4. Electromagnétisme

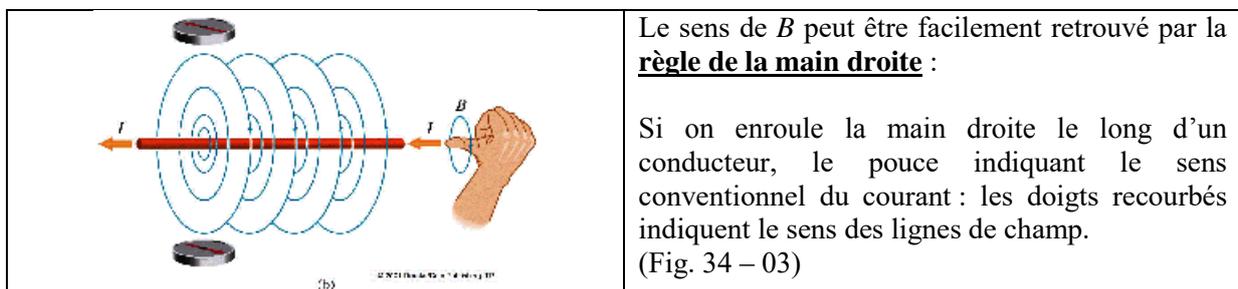
*Les expériences montrent que tout conducteur parcouru par un courant engendre au voisinage de celui-ci un champ magnétique (identique à celui produit par l'aimant)*

*Donc, à partir du courant on peut obtenir un champ magnétique.*

### 4.1 Magnétisme produit par le courant rectiligne



Les lignes de champs sont des cercles disposés dans un **plan perpendiculaire** au conducteur et centré sur celui-ci. (Fig. 34-01). En chaque point,  $B$  est tangent à ces cercles. Le sens de  $B$  est inversé si on permute le sens du courant. (Fig 34-02 (a)(b))



Des expériences, principalement menées par Jean-Baptiste Biot et Félix Savart (1820) ont montré que la grandeur du champ d'induction magnétique est donnée par la formule. (Fig. 34-04)

$$B = \frac{\mu}{2\pi d} I$$

$B$  Induction magnétique, en  $T$   
 $\mu$  Perméabilité magnétique, en  $T.m / A$   
 $I$  Intensité du courant, en  $A$   
 $d$  Distance au conducteur, en  $m$

La constante  $1/2\pi$  a été choisie de façon à permettre des simplifications plus tard. Elle résulte du fait que le système à une symétrie cylindrique.

La **perméabilité magnétique**  $\mu$  est une constante caractéristique du milieu. Dans le vide, la perméabilité magnétique à par définition la

valeur :  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} T.m / A$ . Cette valeur particulière

de  $\mu_0$  résulte du fait que la relation ci-dessus sera utilisée plus tard pour définir l'ampère, unité d'intensité de courant.

On définit également la perméabilité relative :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

$\mu_r$  Perméabilité magnétique relative  
 $\mu$  Perméabilité magnétique, en  $T.m / A$   
 $\mu_0$  Perméabilité magnétique du vide :  $4\pi \times 10^{-7} T / m / A$

Dans le cas de l'air et de l'eau :  $\mu_r \approx 1$ , c'est-à-dire que  $\mu \approx \mu_0$ .

La formule donnant  $B$  devient alors :

$$B = \frac{\mu_r \mu_0}{2\pi} \frac{I}{d} \quad \text{ou encore} \quad B = \mu_r B_0$$

où  $B_0$  est le champ magnétique dans le vide.

### Exemple

La ligne de tension d'un trolleybus est à une hauteur de  $10 \text{ m}$  au-dessus du sol. Elle est rectiligne et parcourue par un courant de  $100 \text{ A}$  dans la direction de l'Est. Décrire le champ magnétique qu'elle produit et calculer la valeur sous la ligne au niveau du sol. Comparer-le avec le champ magnétique terrestre.

### Solution

Avec le courant dans la direction de l'Est, la règle de la main droite nous indique que  $B$  est dirigé vers le Nord. Calculons maintenant la grandeur de  $B$ .

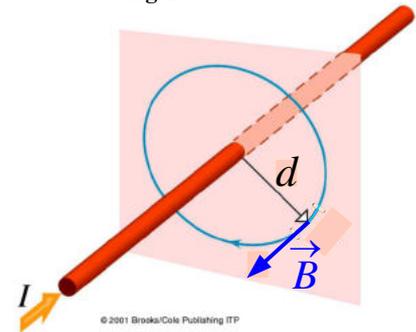
$$B = \frac{\mu_r \mu_0}{2\pi} \frac{I}{d} = \frac{1 \times 4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \frac{100}{10} = 2 \times 10^{-6} T$$

Ce ne représente que 4% du champ magnétique terrestre.

## 4.2 Magnétisme produit par un courant circulaire (spire)

Faisons parcourir un courant dans une boucle, appelée spire et saupoudrons de la limaille de fer sur un plan perpendiculaire à la spire et passant par son centre. Nous obtenons la figure 34-05 (a), (b), (c) qui met en évidence les lignes de champ.

Figure 34-04



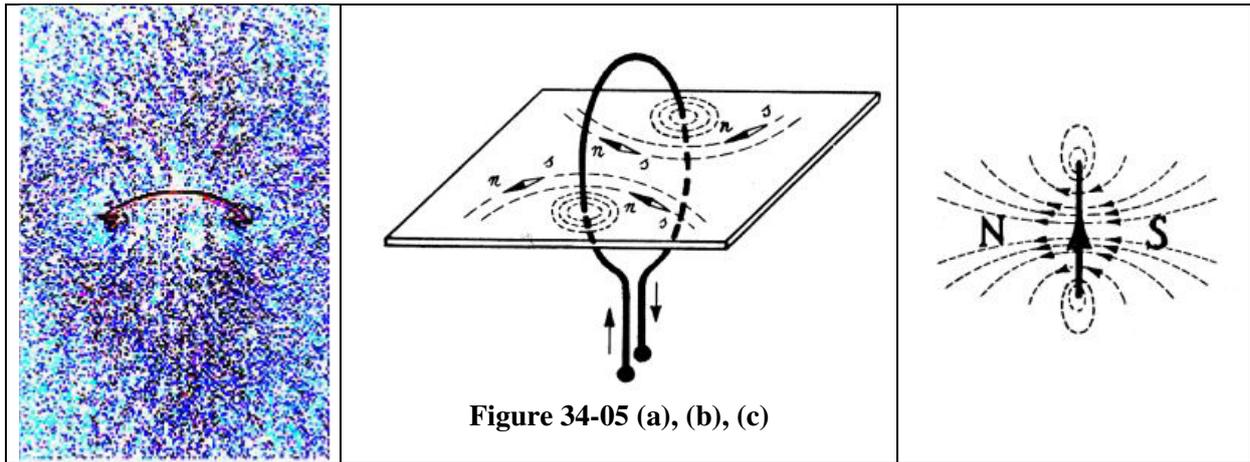


Figure 34-05 (a), (b), (c)

Le sens de  $B$  est toujours donné par la règle de la main droite (Fig. 34-06)

- le pouce est tendu dans le sens du courant
- les doigts courbés donnent le sens de  $B$  au centre de la spire

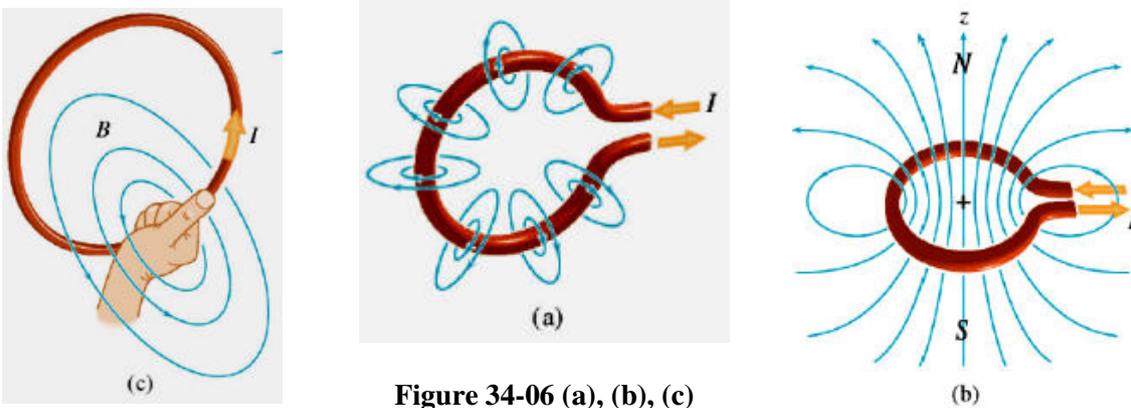


Figure 34-06 (a), (b), (c)

Par convention, les lignes de champ rentrent par la face sud et sortent par la face nord. (Fig. 34-07)

La grandeur de  $B$  au centre de la spire de rayon  $R$  est donnée par la formule :

$$B = \frac{\mu I}{2R}$$

$B$  Induction magnétique, en  $T$   
 $\mu$  Perméabilité magnétique, en  $T.m / A$   
 $I$  Intensité du courant, en  $A$   
 $R$  Rayon de la spire, en  $m$

Note : Il s'agit en fait du champ magnétique au centre de la spire. Dans le vide (ou dans l'air) :

$$B_0 = 2\pi \times 10^{-7} \frac{I}{R}$$

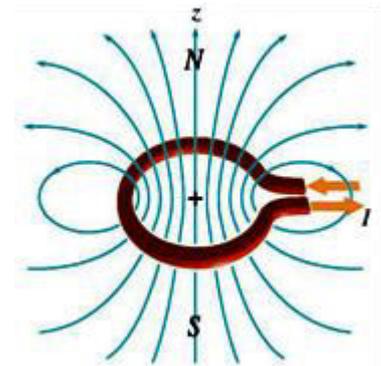


Figure 34.07

### Exemple

Quel est le champ magnétique au centre d'une spire, placée dans l'air, de rayon 2 cm et parcourue par un courant de 10A ?

### Solution

$$B_0 = 2\pi \times 10^{-7} \frac{I}{R} = 2\pi \times 10^{-7} \times \frac{10}{2 \times 10^{-2}} = 3.14 \times 10^{-4} T$$

## 4.3 Champ magnétique produit par un solénoïde

*Un solénoïde est constitué d'un fil conducteur qui a été enroulé autour d'un cylindre de grande longueur par rapport à son diamètre.*

Un solénoïde parcouru par un courant peut être assimilé à un aimant droit. Il possède un pôle nord et un pôle sud. Le sens de  $B$  dépend du sens du courant. (Fig. 34-08)  
Le champ magnétique cesse dès que l'on coupe le courant.



Figure 34-08 (a),(b),(c)

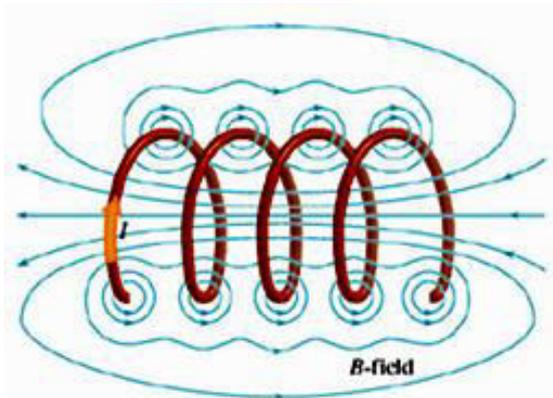
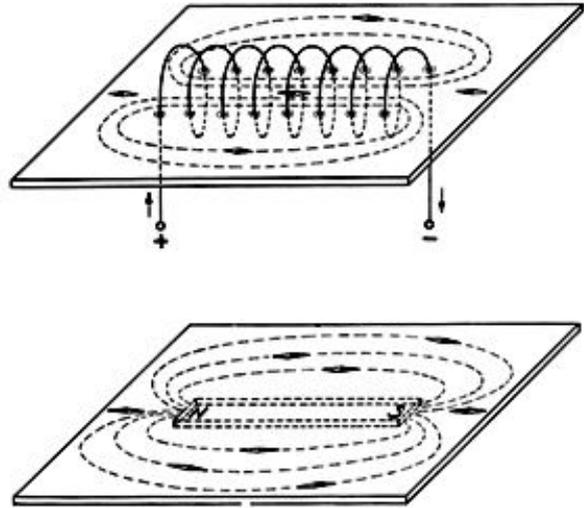


Figure 34-09 : Le champ magnétique d'une bobine de quelques spires peu serrées.

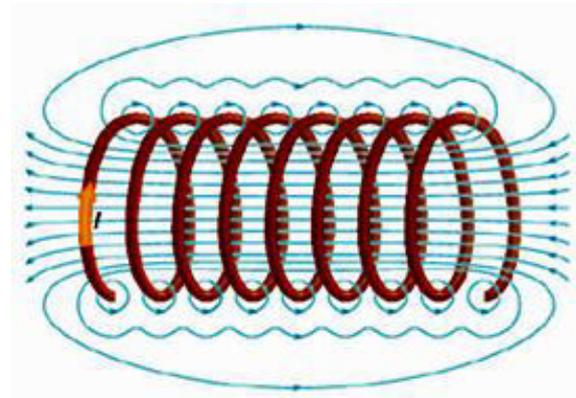
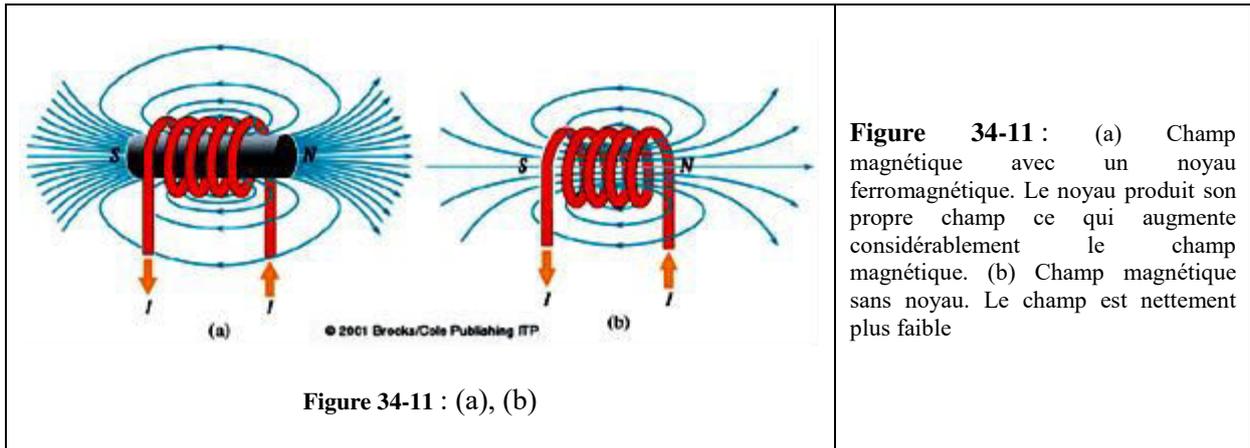


Figure 34-10 : Le champ magnétique quand la bobine est enroulée avec des spires plus serrées et plus dense. Le champ devient plus intense et plus uniforme.

*Le champ magnétique  $B$  produit au centre d'un solénoïde peut être augmenté :*

- *en augmentant l'intensité du courant*
- *en augmentant le nombre de spires (= les tours de la bobine)*
- *en diminuant sa longueur  $L$*
- *en introduisant en son centre un morceau de fer.*

*Le morceau de fer aussi appelé noyau de fer a donc pour effet d'amplifier le magnétisme produit par le solénoïde. En fait, le noyau qui s'est lui-même magnétisé suite au magnétisme créé par le courant, superpose son influence à celle de la bobine ou du solénoïde.*

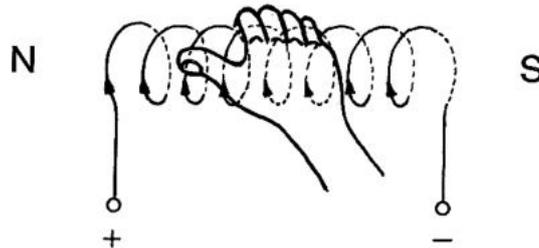


La valeur de  $B$  au centre du solénoïde est donnée par la formule

$$B = \mu \frac{N}{l} I$$

$B$  Induction magnétique au milieu du solénoïde, en  $T$   
 $\mu$  Perméabilité magnétique, en  $T.m / A$   
 $N$  Nombre de spires  
 $l$  Longueur du solénoïde, en  $m$   
 $I$  Intensité, en  $A$

Le sens de  $B$  est toujours donné par la règle de la main droite. (Figure 3-34)



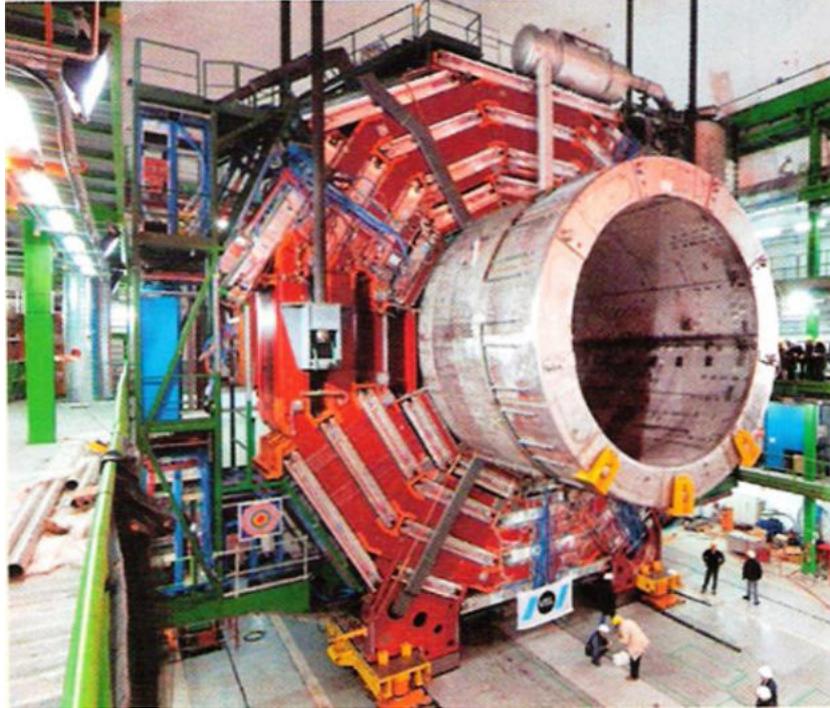
### Exemple

Un solénoïde de 20 cm de long, comporte 100 spires, et un noyau en acier de perméabilité magnétique relative égale à 500. Quel est le champ magnétique à l'intérieur du solénoïde lorsque les spires sont parcourues par un courant de 3 A ?

### Solution

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{N}{l} I = 500 \times 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{100}{0.2} \times 3 = \frac{5 \times 4\pi \times 3}{2} \times 10^{2-7+2+1} = 0.3\pi T \approx 1 T$$

Ce qui est un champ très intense.



**Figure 34-11-1** : Le plus grand aimant solénoïdal supraconducteur du monde est intégré dans une expérience du CERN près de Genève, l'un des centres de recherche phares en physique des particules. En ayant recours à des matériaux supraconducteurs refroidis à la température de  $-271,25^{\circ}\text{C}$ , on parvient à obtenir à un champ magnétique de 4 teslas, soit environ 100 000 fois le champ magnétique terrestre.

## 4.4 L'électro-aimant

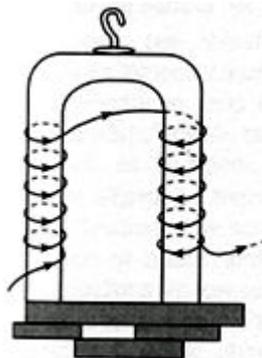
### 4.4.1 Définition

Un électro-aimant est un ensemble formé d'une bobine et d'un noyau de fer

### 4.4.2 Applications

#### Electroaimant porteur

On utilise les forces attractives développées par les pôles d'un électroaimant pour soulever des substances magnétiques, pour les transporter ailleurs, ou pour les trier parmi d'autres. Les objets soulevés par les électroaimants industriels peuvent atteindre plusieurs tonnes. (Fig. 34-12)



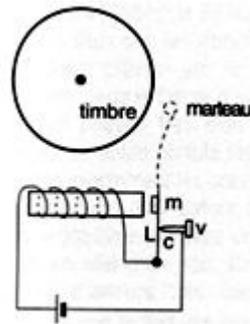
Figures 34-12 (a), (b)



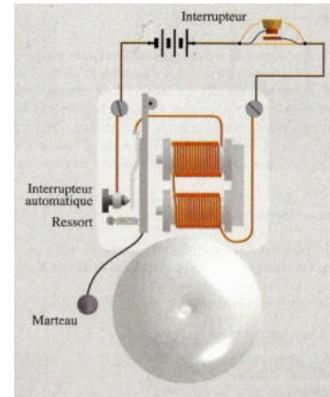
#### Interrupteurs automatiques

Décrivons, ci-dessous, à titre d'exemples, quelques interrupteurs automatiques.

**La sonnette électrique :** l'objet magnétique  $m$  est attiré par le pôle de l'électroaimant qui lui fait face, ce qui provoque une frappe du marteau sur le timbre. Le circuit électrique est alors coupé en  $c$ . La lame élastique  $L$  est ensuite rappelée vers la pointe de la vis  $V$ . Le circuit électrique se ferme alors de nouveau et le phénomène recommence. (Fig. 34-13)



Figures 34-13 (a),(b)



**Les disjoncteurs :** On les retrouve, entre autres, dans les tableaux de distribution des installations électriques de nos habitations. Rappelons qu'ils ont pour rôle d'interrompre immédiatement le courant électrique en cas de surintensité dans un circuit. Une surintensité dans un circuit est évidemment dangereuse parce qu'elle peut provoquer un échauffement exagéré des fils électriques (effet Joule) qui pourrait amener une rupture du circuit (dans un mur par exemple) ou, plus grave encore, un incendie.

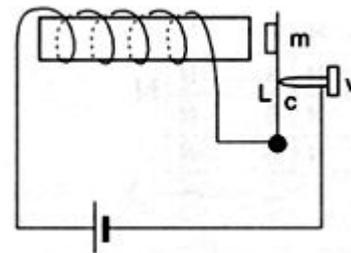


Figure 34-14 (a), (b)



Le principe de fonctionnement du disjoncteur est assez simple et quasiment identique à celui de la sonnette électrique (Fig. 34-14). Tant que l'intensité du courant n'est pas trop élevée, la lamelle  $L$  reste en contact avec la vis. Par contre, si l'intensité du courant devient trop élevée, la lamelle  $L$ , attirée de manière beaucoup plus importante vers l'électroaimant, quitte le contacteur  $c$ , ce qui provoque l'ouverture du circuit. Contrairement à la sonnette électrique, la lamelle  $L$  ne revient pas vers la vis  $V$ .

**Les relais.** L'apparition d'un courant électrique dans un circuit provoque l'ouverture ou la fermeture d'autres circuits électriques indépendants. Ainsi à la figure 34-15 :

- En l'absence de courant électrique dans le circuit 1, le circuit 2 est ouvert et le circuit 3 est fermé.
- Si un courant suffisamment important parcourt le circuit 1, l'objet magnétique  $m$  va se déplacer vers l'électroaimant, provoquant la fermeture du circuit 2 et l'ouverture du circuit 3.

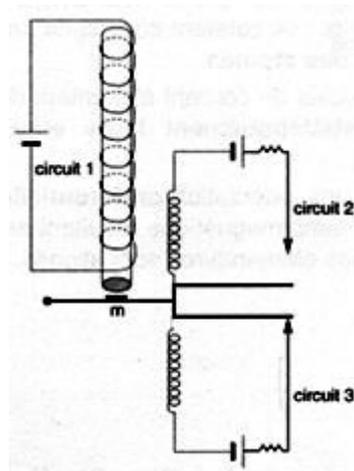


Figure 33-15 (a),(b)

« **Tête d'enregistrement** » d'un **magnétophone**. Une bande magnétique supporte sur toute sa longueur des particules ferromagnétiques dont la taille mesure de 1 à 2  $\mu\text{m}$ , produit un champ magnétique commandé par le signal à enregistrer. Ce champ magnétique aimante ces particules selon une direction donnée et selon un sens précis lorsque la bande magnétique défile à proximité : d'un endroit à l'autre cette aimantation varie en fonction de l'enregistrement. Un principe similaire est appliqué dans la conception des unités de disquettes informatiques. (Fig. 34-16)

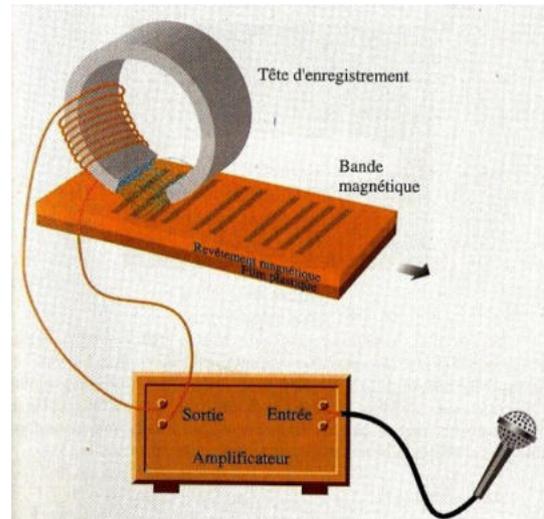
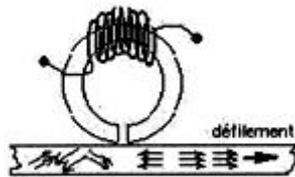


Figure 34-16 (a),(b)

## 4.5 Interprétation de l'aimantation : modèle d'Ampère

À ce stade, deux faits expérimentaux nous suggèrent des hypothèses concernant l'origine des propriétés magnétiques d'un aimant.

1. Nous avons vu qu'en brisant un aimant, il était impossible d'isoler un pôle.

On peut imaginer que cette expérience se reproduit indéfiniment: on en arriverait à décomposer l'aimant en une multitude d'aimants élémentaires (dipôles magnétiques) dont les dimensions seraient de l'ordre de grandeur de celles des atomes. (Fig. 34-17)

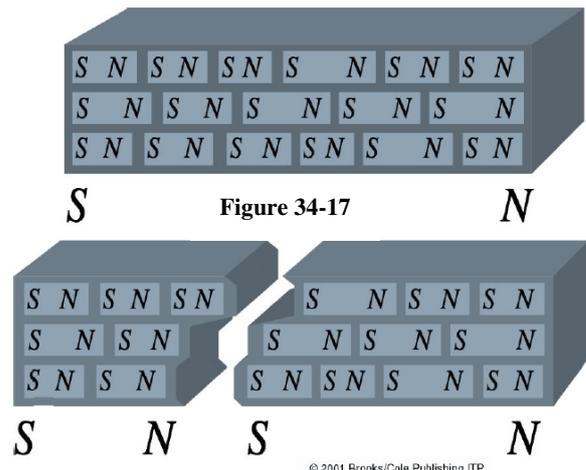


Figure 34-17

© 2001 Brooks/Cole Publishing ITP

*L'aimantation résulterait donc d'une propriété de la matière affectant tout l'aimant et non seulement ses extrémités. Si les propriétés magnétiques ne se manifestent qu'au voisinage de celles-ci, c'est parce que les dipôles intérieurs annuleraient mutuellement leurs effets.*

2. Nous avons observé également qu'un solénoïde présentait un spectre extérieur semblable à celui d'un barreau aimanté.

Cette constatation suggère que les dipôles élémentaires seraient constitués de courants électriques circulant dans le même sens.

Cette hypothèse des «boucles élémentaires de courant» avait déjà été formulée par Ampère vers 1820.

Les connaissances actuelles sur l'organisation de l'atome nous permettent de préciser la nature de ces courants: ils seraient constitués par les **mouvements des électrons autour des atomes**.

Dans une matière non aimantée, les boucles de courant s'orientent de manière **aléatoire, en compensant statistiquement leurs effets magnétiques**. (Fig. 34-18)



Figure 34-18

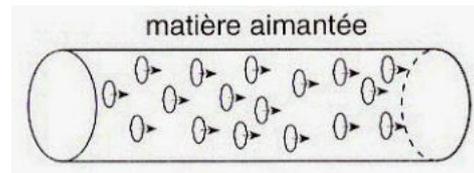


Figure 34-19

Dans la matière aimantée, il existerait une orientation **préférentielle des boucles** de courant  
Le champ magnétique résultant est évidemment important puisque les champs élémentaires sont alignés. (Fig. 34-19)

## 5 La force électromagnétique ou force de Laplace

### 5.1 Expérience

- Disposons un conducteur sur deux rails de manière à ce qu'il puisse se déplacer tout en étant parcouru par un courant électrique. (Fig. 35-01)
- Plaçons ce conducteur parcouru par un courant électrique produit par un aimant en fer à cheval et observons le mouvement.
- Invertissons le sens du courant électrique dans le conducteur et observons son mouvement.
- Invertissons les pôles de l'aimant et observons le mouvement du conducteur.

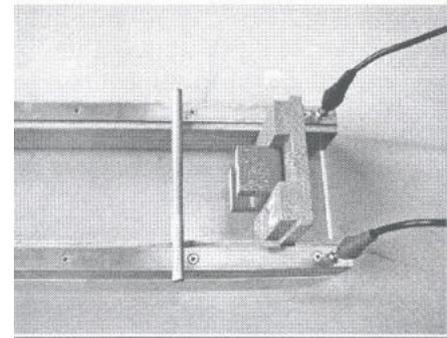
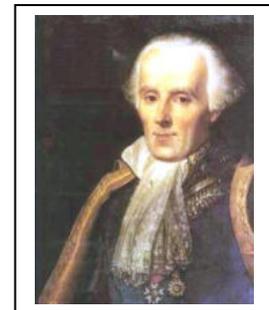


Figure 35-01

Le conducteur se déplace et le sens de son déplacement s'inverse lorsqu'on inverse le sens du courant électrique et lorsqu'on inverse les pôles.  
La force qui agit est appelée « **force électromagnétique** » ou force de Laplace.

**Pierre-Simon Laplace**, né le 23 mars 1749 à Beaumont-en-Auge et mort le 5 mars 1827. à Paris, est un mathématicien, astronome et physicien français.

Laplace est l'un des principaux scientifiques de la période napoléonienne ; en effet, il a apporté des contributions fondamentales dans différents champs des mathématiques, de l'astronomie et de la théorie des probabilités



### 5.2 Conclusions

**On constate que tout conducteur parcouru par un courant  $I$  et placé dans un champ magnétique  $B$  est soumis à une force appelée force électromagnétique  $F$ .**

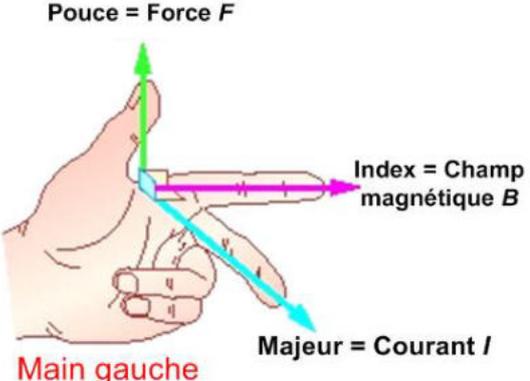
Dès que le courant est interrompu ou que l'aimant est retiré, le conducteur reprend sa position initiale.

Plus le courant est important, plus la force est grande.

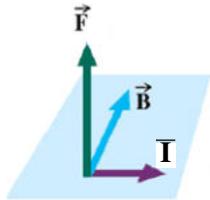
Si on inverse le sens du courant ou celui de  $B$ , le sens de la force s'inverse.

Lorsque le conducteur est placé parallèlement au vecteur  $B$ , la force est nulle.

## 5.3 Expression de la force électromagnétique F

<b>Direction :</b>	<i>La perpendiculaire à B et à l'élément de courant I</i>	
<b>Sens :</b>	<i>Déterminé par la règle des 3 doigts perpendiculaires de la main gauche. (FBI) (Fig. 35-02)</i>	
<b>Grandeur</b>	<i>F est proportionnelle à :</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>l'intensité du courant I</i></li> <li>▪ <i>au champ magnétique B</i></li> <li>▪ <i>la longueur L du circuit qui est soumis au champ magnétique</i></li> </ul>	

Dans le cas, où le conducteur est le vecteur champ magnétique sont perpendiculaires alors



$$F = B.I.L$$

*F* Force électromagnétique, en N  
*B* Induction magnétique, en T  
*I* Intensité du courant, en A  
*L* Longueur du conducteur, en m

Si le conducteur fait avec le champ magnétique B un angle  $\alpha$ , (fig. 35-03) alors

$$F = B.I.L.\sin\alpha$$

F est maximale pour  $\alpha = 90^\circ$

F est minimale pour  $\alpha = 0^\circ$

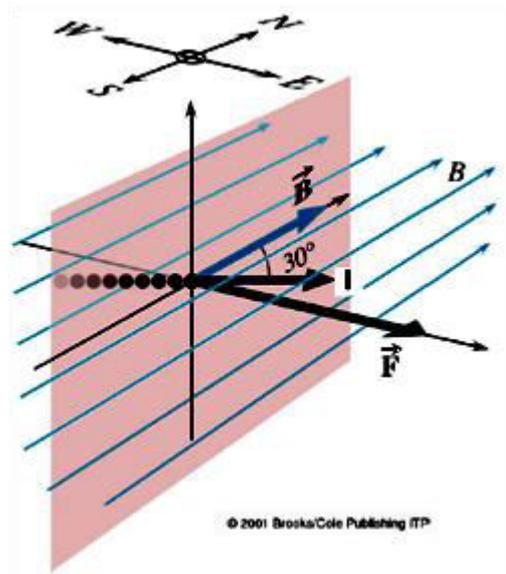
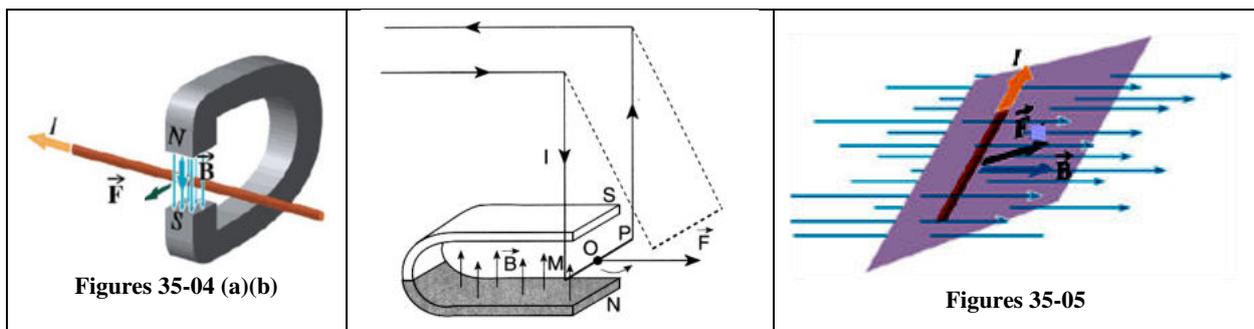


Figure 35-03 : Le courant I fait ici un angle de  $30^\circ$  avec B

### Exemples :



**Exemple**

Une spire rectangulaire, plate et horizontale est placée dans un champ magnétique uniforme et vertical de  $0.10\text{ T}$ . (Fig. 35-06). Le côté  $FC$  mesure  $30\text{ cm}$  et le côté  $CD$  mesure  $20\text{ cm}$ . Déterminer la force totale agissant sur la spire quand elle transporte un courant de  $1.0\text{ A}$ .

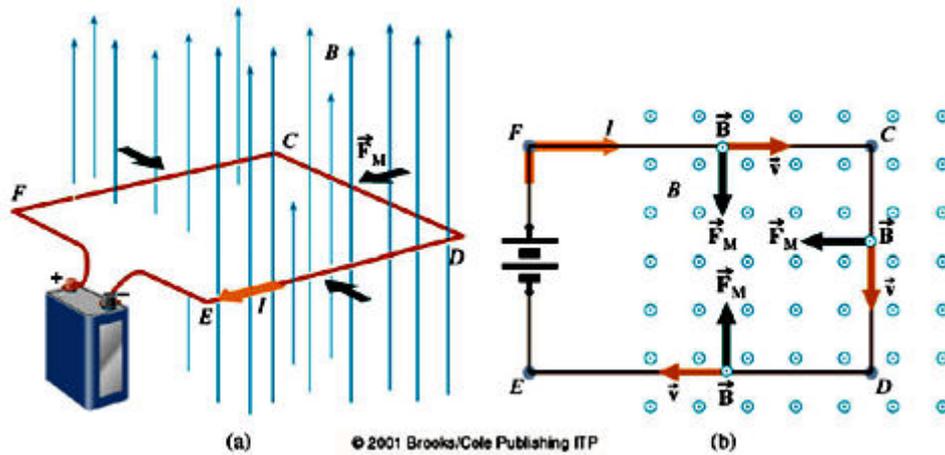


Figure 35-06

**Solution**

Le courant circule dans le sens des aiguilles d'une montre dans le circuit à partir de la borne positive de la pile. La direction de la force sur chaque segment est donnée par la règle de la main gauche et est illustrée sur la figure 3-48. Les forces qui s'exercent sur les segments  $FC$  et  $DE$  sont opposés. Leur résultante est nulle. La force est donc celle agissant sur  $CD$  :

$$F = B.I.L.\sin\alpha = 0.1 \times 1.0 \times 0.20 \times \sin 90^\circ = 0.020\text{ N}$$

**Exemple**

Un conducteur de  $40\text{ cm}$  de longueur et transportant un courant de  $3\text{ A}$  fait un angle de  $60^\circ$  avec le champ  $B$  d'intensité de  $0.2\text{ T}$ . (Voir figure 3-47). Quel est la force électromagnétique qui agit sur le conducteur.

**Solution**

La direction de la force est donnée par la règle de la main gauche et est illustrée à la figure 35-02. La grandeur de la force est donnée par :

$$F = BIL\sin\alpha = 0.2 \times 3 \times 0.4 \times \sin 60^\circ = 0.26\text{ N}$$

**Exemple**

Un fil de cuivre de section  $2.5\text{ mm}^2$  est placé horizontalement et perpendiculairement à un champ  $B$  de  $1\text{ T}$  lui aussi de direction horizontale. Quel est l'intensité du courant qu'il faut faire passer dans le fil pour que la force électromagnétique (qui est verticale) compense le poids du fil ? (Masse volumique du cuivre :  $\rho = 8870\text{ Kg/m}^3$ )

**Solution**

$$F_{\text{poids}} = F_{\text{électromagnétique}} \rightarrow mg = BIL \rightarrow I = \frac{mg}{BL}$$

Or  $m = \rho V = \rho SL$  où  $S$  = section du fil et  $L$  = longueur du fil

$$\rightarrow I = \frac{\rho Sg}{B} = \frac{8870 \times 2.5 \times 10^{-6} \times 9.81}{1} = 0.22\text{ A}$$

## 5.4 Applications

- principe du haut-parleur
- principe du moteur électrique
- appareil de mesure à cadre mobile
- mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique

### 5.4.1 Le haut-parleur

Les différents éléments trouvés dans un HP sont : *l'aimant, la bobine, une membrane (solidaire de la bobine)* (Fig. 35-07)

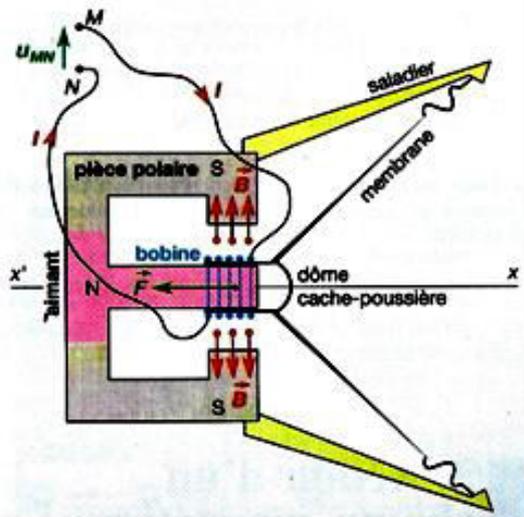


Figure 35-07

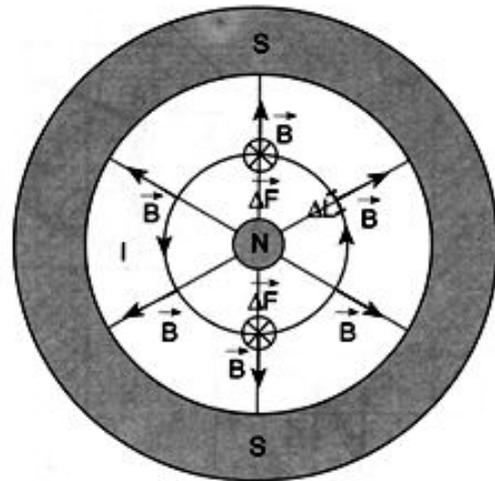


Figure 35-08

La bobine est reliée à la sortie d'un ampli ou d'un GN de courant alternatif d'une certaine fréquence  $f$ . Si la bobine est parcourue par un courant dans un certain sens, elle se comporte comme un aimant N-S. Si cette même bobine est parcourue par un courant en sens opposé, elle se comporte comme un aimant S-N.

*Cette même bobine étant à proximité d'un autre aimant, elle est parfois attirée parfois repoussée suivant le sens du courant* (Fig. 35-08)

Le mouvement du va-et-vient de la membrane du HP est de la même fréquence que la fréquence du courant.

La bobine étant solidaire d'une membrane, celle-ci vibre à la fréquence  $f$  du courant.

Elle engendre un son de même fréquence.



*Le HP transforme un courant alternatif en un son de même fréquence*

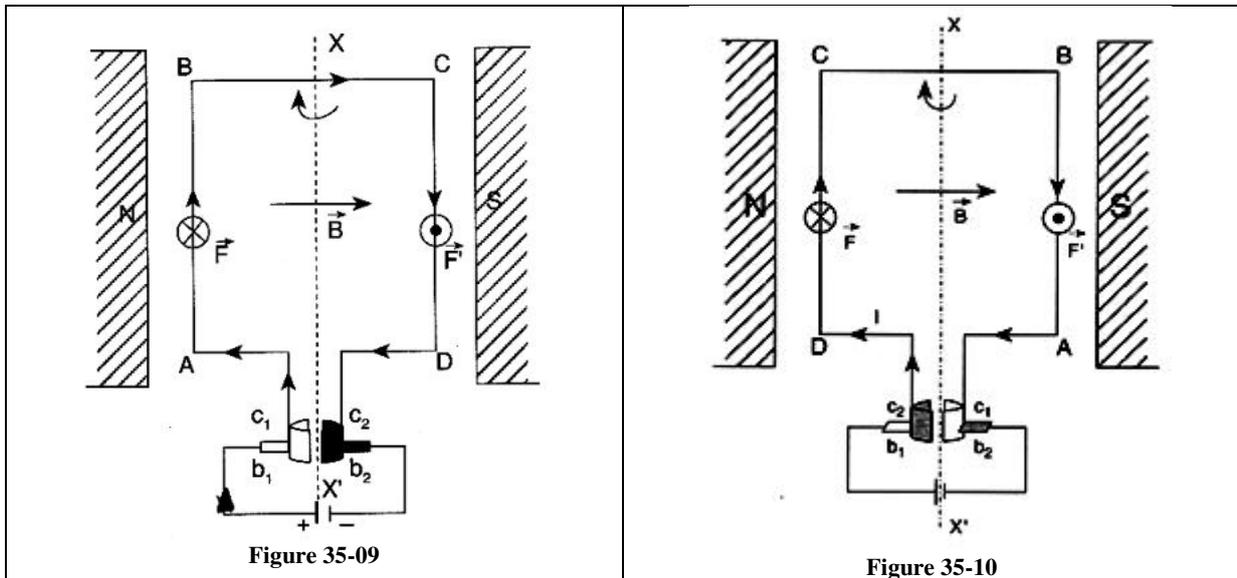
## 5.4.2 Le moteur électrique

### 5.4.2.1 Principe

Soit une spire rectangulaire  $ABCD$  placée dans un champ magnétique et pouvant tourner autour de l'axe  $XX'$ . (Fig. 35-09)

Le champ est produit par un aimant [N-S] ou un électro-aimant.

Les extrémités sont solidaires de 2 petits anneaux  $C_1$  et  $C_2$  appelés : les collecteurs.



Les 2 collecteurs tournent avec la spire.

Des balais de carbone fixes frottent sur ces collecteurs et sont connectés aux bornes d'un générateur.

*Lorsqu'on envoie du courant la spire, comme elle placée dans un champ magnétique, elle est soumise à force (fonction du sens du courant), perpendiculaire au plan de la feuille.*

*Sous l'action de ces 2 forces de sens opposés, le cadre tourne dans le sens indiqué.*

Si le courant dans les fils montants n'était pas changé, le cadre (après un  $\frac{1}{2}$  tour) retournerait en sens inverse et il oscillerait.

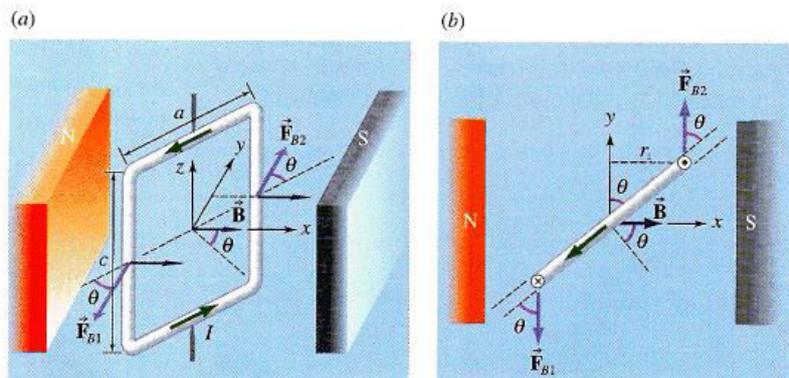
Pour éviter cela, lorsque le cadre fait un  $\frac{1}{2}$  tour, le balai  $b_1$  se met en contact avec le collecteur  $C_2$  et le balai  $b_2$  se met en contact avec le collecteur  $C_1$ . (Fig. 35-10)

Résultat : *le courant monte toujours dans le fil de gauche et il descend toujours dans le fil de droite ce qui permet à la spire d'effectuer une rotation continue toujours dans le même sens.*

Le système (balais-collecteurs) est nécessaire pour assurer une rotation continue du moteur.

**Figure 35-11**

Un cadre parcouru par un courant, libre de pivoter dans un champ magnétique. Les forces magnétiques agissant sur les côtés verticaux produisent un moment de force par rapport à l'axe central. (a) Le cadre vu de côté; (b) le cadre vu d'en haut.



### 5.4.3 Le galvanomètre à cadre mobile

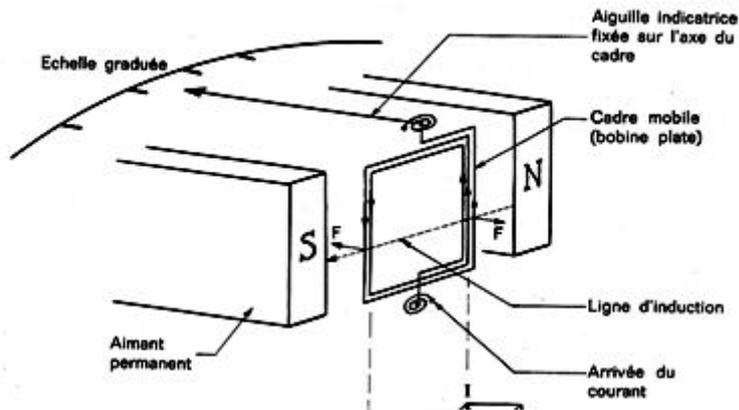


Figure 35-12

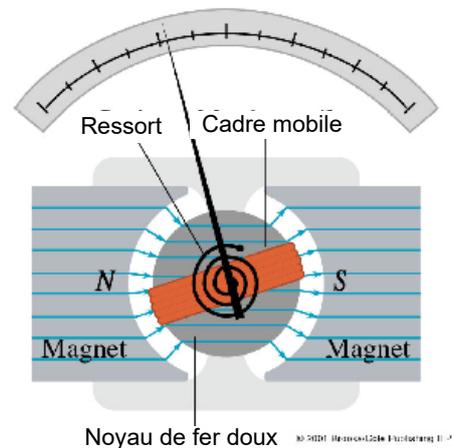


Figure 35-13

Un galvanomètre est un ampèremètre qui permet de mesurer des courants de faibles intensités. Le cadre est constitué d'un conducteur enroulé en plusieurs spires autour d'un cylindre en fer doux. Une aiguille est fixée sur le cadre. Le courant arrive par l'intermédiaire de deux ressorts en spirale qui s'opposent à la rotation du cylindre. Le tout est placé entre les pôles d'un aimant. Lorsque l'ampèremètre est branché dans un circuit électrique, des forces électromagnétiques agissent sur chaque partie latérale du cadre et tendent à faire tourner le cadre. A cause des ressorts, le cadre va tourner jusqu'à atteindre la position d'équilibre. La déviation du cadre et de l'aiguille sera d'autant plus importante que l'intensité du courant électrique est élevée car les forces électromagnétiques sont proportionnelles à l'intensité du courant.

### 5.4.4 Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique

Rappel : Une particule placée dans un champ électrique  $E$  subit une force. La force a le sens du champ électrique si la particule a une charge positive et a le sens contraire si la particule a une charge négative. Si la particule est libre, la particule prendra un mouvement rectiligne uniformément accéléré. Ainsi un électron soumis à une différence de potentiel  $U$  acquiert une énergie  $W = q.U$  qui se transforme en énergie cinétique : (Voir paragraphe 6.5 du chapitre Electrostatique)

Si une particule libre, chargée, animée d'une vitesse  $v$  se déplace dans un champ magnétique  $B$ , alors elle subira une force électromagnétique perpendiculaire au plan formé par  $B$  et la direction de la vitesse  $v$ . (Fig. 35-14)

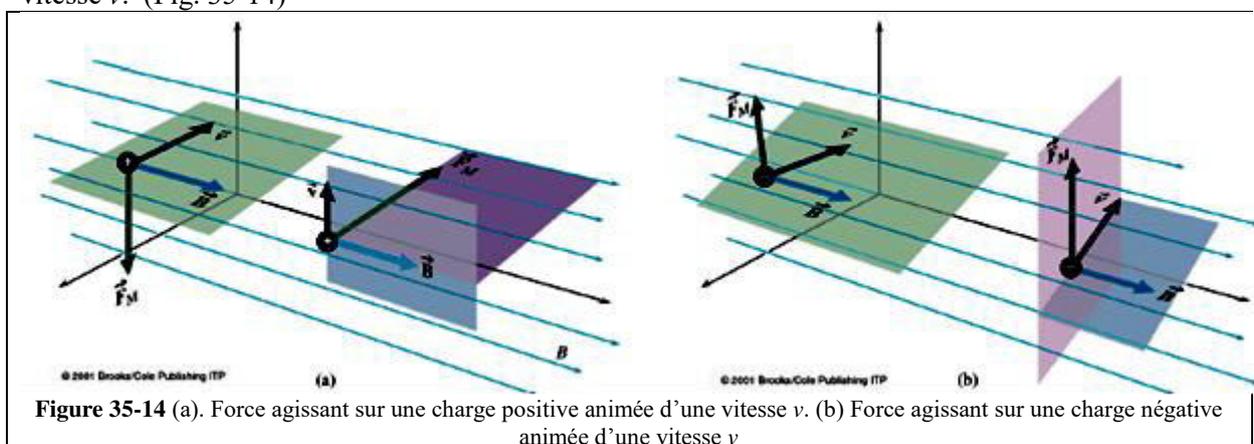


Figure 35-14 (a). Force agissant sur une charge positive animée d'une vitesse  $v$ . (b) Force agissant sur une charge négative animée d'une vitesse  $v$

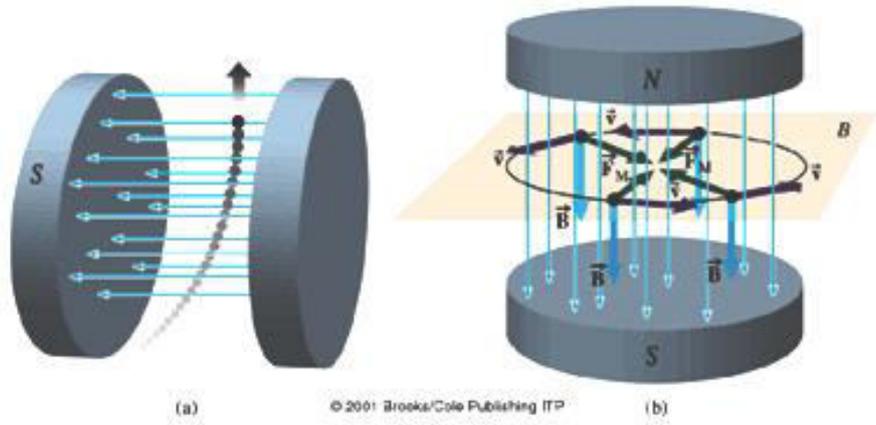


Figure 35-15

Comme la force électromagnétique est perpendiculaire à la direction de la vitesse, la trajectoire suivie par la particule sera circulaire. (Fig. 35-15). Notons qu'en réalité, et pour des raisons qui sortent largement de ce cours, la particule émet un rayonnement et perd de l'énergie. La trajectoire est en réalité une spirale qui se rapproche du centre.

Si un corps se déplace sur un cercle de rayon  $R$ , il est alors soumis à une force centripète :  $F_c = \frac{mv^2}{R}$ .

Cette force centripète est égale à la force électromagnétique qui pour une particule de charge positive vaut :  $F = qvB$  où  $q$  est la charge de la particule.

Alors :  $qvB = \frac{mv^2}{R} \rightarrow R = \frac{mv}{qB}$ .

Le rayon de la trajectoire dépend donc de la masse. Cette propriété est utilisée dans le spectromètre de masse. (Fig. 35-16, 35-17 et 35-17-1)

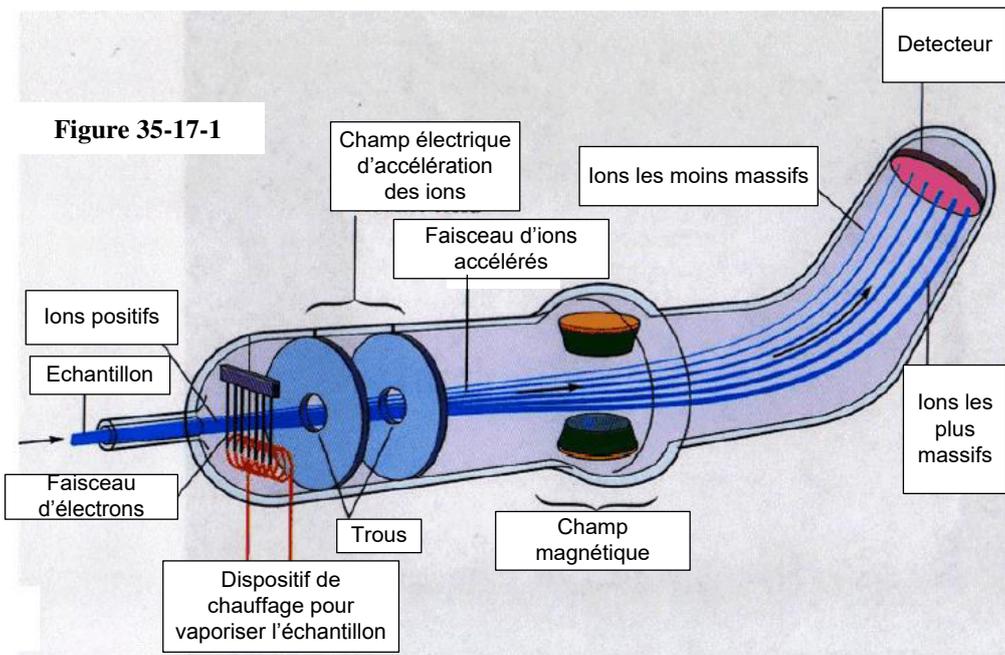


Figure 35-17-1

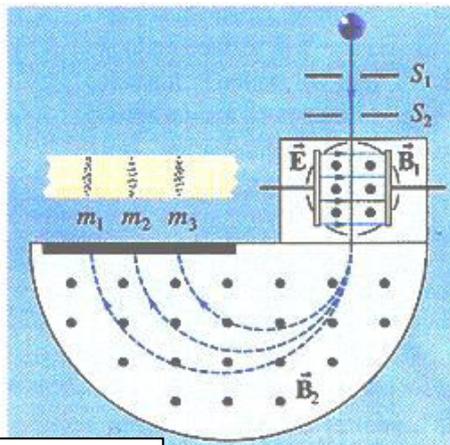


Figure 35-16

Le spectromètre de masse de Bainbridge sépare les particules chargées en fonction de leur rapport charge/masse. Elles traversent d'abord un sélecteur de vitesse, puis décrivent une trajectoire demi-circulaire dans le champ magnétique  $\vec{B}_2$ . Une plaque photographique enregistre les impacts des particules.

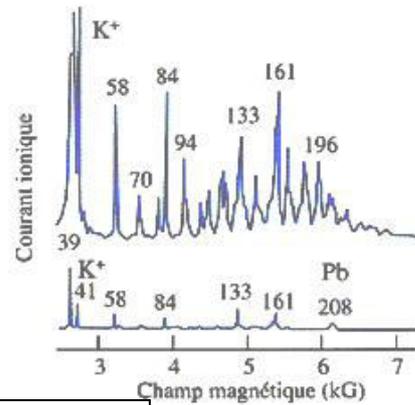


Figure 35-17

Une spectrographie de masse réalisée sur l'air d'une pièce avant et après qu'on y ait fumé une cigarette. Les pics 84 et 161 sont dus à la nicotine. (W. D. Davis, *Environmental Science Technology*, n° 11, 1977, p. 543.)

Lecture: les cyclotrons



cyclotron

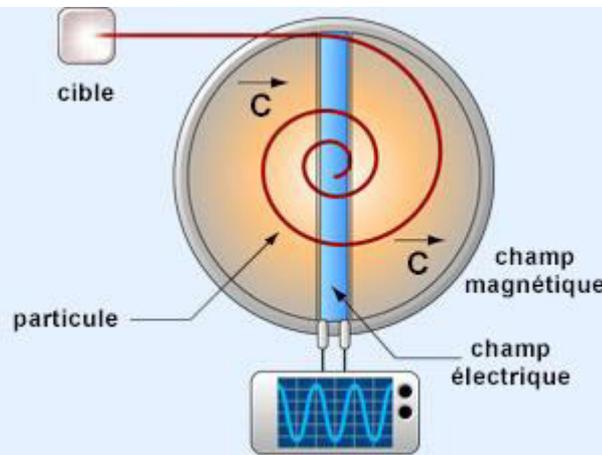


Figure 35-17-2

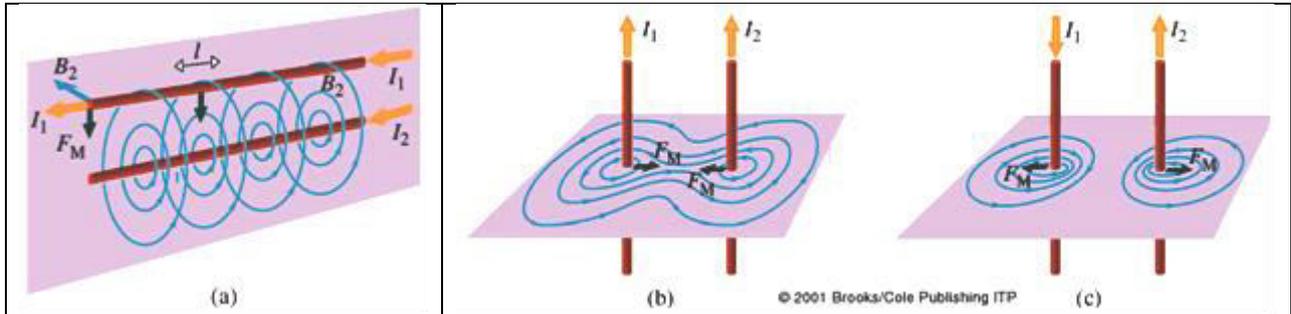
Le cyclotron est le premier accélérateur circulaire. Il est formé de deux parties vides accolées en forme de D. Un puissant électroaimant produit un champ magnétique uniforme qui permet aux particules placées dans le cyclotron d'acquies un mouvement circulaire uniforme (à vitesse constante). Mais, en passant d'une partie à l'autre, elles sont accélérées (ce qui augmente leur énergie cinétique) par un champ électrique. Ce qui va augmenter le rayon de leurs trajectoires, ce qui donne aux particules présentes dans le cyclotron une trajectoire en spirale. Ses particules, sont amenées dans le cyclotron alors qu'elles sont déjà accélérées. Dans le cyclotron, les particules arrivent à une vitesse proche de la vitesse lumière, et leur masse augmente fortement (selon la théorie de la relativité).

Le plus puissant cyclotron du monde est le K1200 de l'université de Michigan, cet appareil peut accélérer des noyaux à une énergie proche de 8GeV.

Historiquement, le cyclotron a permis la découverte de plusieurs particules fondamentales. Ils peuvent accélérer des particules chargées, des ions lourds mais pas les électrons.

## 5.5 Interactions entre 2 fils parallèles.

### 5.5.1 Expérience



**Figure 35-18** (a) Deux fils parallèles où circulent des courants. Chaque fil baigne dans le champ magnétique  $B$  de l'autre (b), Lorsque les courants sont dans le même sens, les conducteurs s'attirent, (c) Quand les courants sont de sens opposés, les conducteurs se repoussent.

#### Conclusion

- Les fils parallèles transportant des courants de même sens s'attirent.
- Les fils parallèles transportant des courants de sens opposés se repoussent.

### 5.5.2 Interprétation

L'induction  $B_1$  créée par  $I_1$  sur le conducteur 2 est :

$$B_1 = 2 \times 10^{-7} \times \frac{I_1}{d}$$

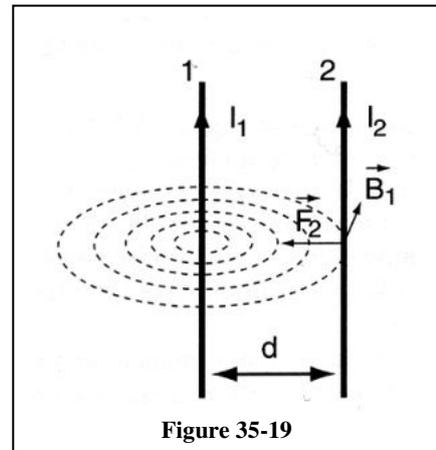
La force électromagnétique sur le conducteur 2 est :

$$F_2 = I_2 B_1 L$$

Donc :

$$F_2 = 2 \times 10^{-7} \frac{I_1 I_2}{d} L$$

Si dans cette formule  $I_1 = I_2 = 1 \text{ A}$ ,  $L = 1 \text{ m}$ ,  $d = 1 \text{ m}$ , on a  $F = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$



**Figure 35-19**

### 5.5.3 Définition légale de l'ampère

*L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui passant dans 2 fils conducteurs rectilignes // de longueur infinie et de section négligeable, placés dans le vide à un mètre l'un de l'autre, produit entre ces 2 conducteurs une force de  $2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$  par mètre de longueur.*

## 6. Induction électromagnétique

Dans cette partie du cours, on se propose d'étudier les phénomènes dans lesquels il y a création de courant électrique sans l'utilisation d'une pile ou d'un générateur. Ce type de phénomène aboutira sur la création d'un nouveau type de courant appelé : courant alternatif.

### 6.1 Production d'un courant à partir d'un aimant

Lorsqu'on parle d'électricité, de courant électrique, on pense toujours aux mots « pile, batterie, générateur, dynamo de vélo »

Il existe une autre façon très utilisée en pratique pour produire un courant dans un circuit.

*Elle est basée sur le phénomène d'induction électromagnétique et les courants ainsi créés sont appelés courants induits.*

#### 6.1.1 Les courants induits

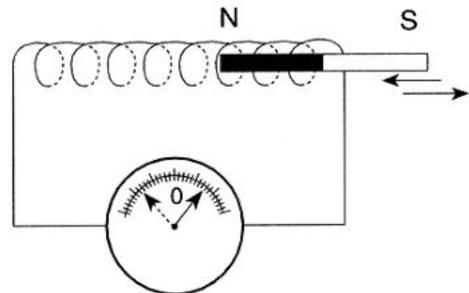
##### 6.1.1.1 Expérience de base

Soit une bobine, un aimant et un ampèremètre (Fig. 36-01)

##### 6.1.1.2 Conclusions

*L'expérience montre que l'on peut créer un courant dans un circuit ne possédant pas de générateur : on parle de courant induit.*

*Pour créer ces courants dans une bobine, il suffit de déplacer un aimant dans cette bobine ou de déplacer la bobine vers l'aimant.*



*Le courant s'arrête dès que le mouvement cesse.*

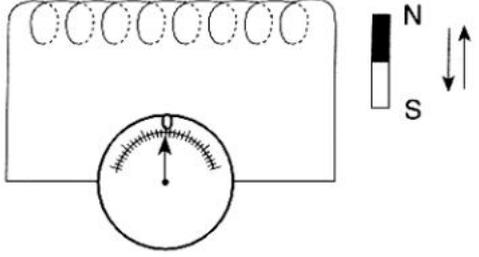
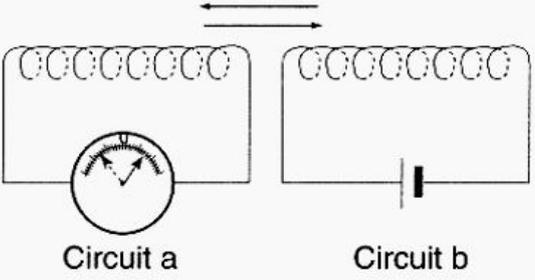
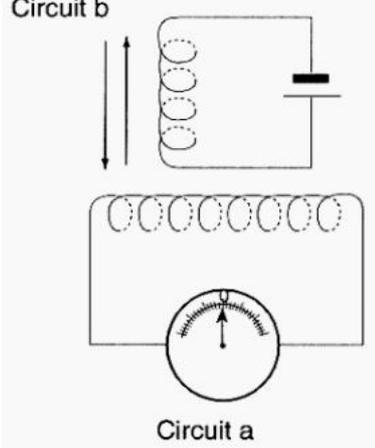
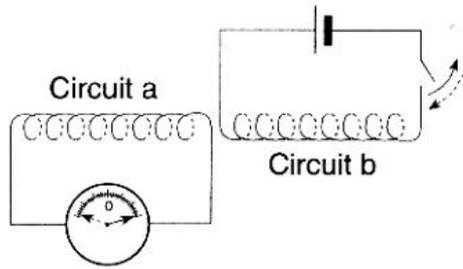
- *Le courant se nomme courant induit*
- *La bobine se nomme bobine induite ou l'induit*
- *L'aimant est appelé inducteur*
- *Le phénomène de production des courants induits porte le nom d'induction électromagnétique*

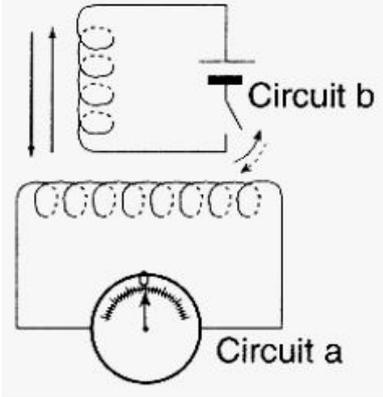
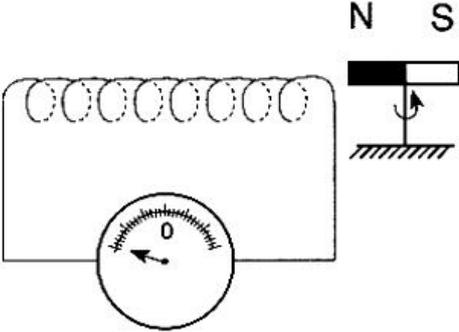
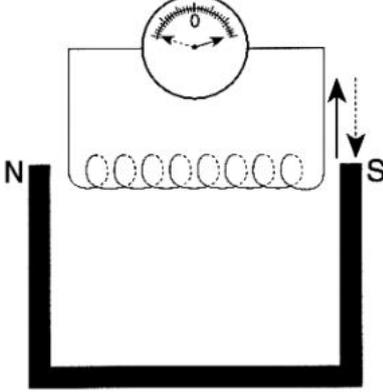
Notons que si l'aimant s'approche de la bobine, le courant grandit vers le positif (courant dans un certain sens) et si l'aimant recule, le courant grandit vers le négatif (courant dans l'autre sens)

*n crée par le mouvement de va-et-vient de l'aimant, un courant dit alternatif dont la fréquence est la même que celle du mouvement* (voir chapitre suivant)

*Les « machines » permettant la création d'un courant alternatif sont appelées des alternateurs.*

### 6.1.1.3 Autres procédés de production de courants induits

<p>1) Si nous recommençons la même expérience en ayant placé l'axe de l'aimant perpendiculairement à celui de la bobine, le mouvement de l'aimant ne produit aucun courant.</p> <p>2) Refaisons les expériences précédentes en laissant l'aimant fixe et en déplaçant la bobine. Nous observons les mêmes effets que précédemment.</p>	 <p style="text-align: center;"><b>Figure 36.02</b></p>
<p>3) Remplaçons le barreau aimanté par un second bobinage raccordé à un générateur.</p> <p>Dans un premier temps, les axes des bobines se trouvent dans le prolongement l'un de l'autre.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lorsqu'on approche le circuit <i>b</i>, on mesure un courant dans le circuit <i>a</i>.</li> <li>▪ Lorsque les bobines restent proches l'une de l'autre, on ne mesure plus aucun courant.</li> <li>▪ Lorsqu'on recule le circuit <i>b</i>, on mesure dans le circuit <i>a</i> un courant de sens contraire à celui observé précédemment.</li> </ul>	 <p style="text-align: center;"><b>Figure 36.03</b></p>
<p>4) Plaçons la bobine du circuit <i>b</i> de telle manière que son axe soit perpendiculaire à celui de la bobine du circuit <i>a</i> ? Déplaçons la bobine <i>b</i> vers le haut puis vers le bas, l'aiguille de l'ampèremètre dans le circuit <i>a</i> n'indique aucun courant.</p>	 <p style="text-align: center;"><b>Figure 36-04</b></p>
<p>5) Dans toutes les expériences qui précèdent, une partie du montage était en mouvement par rapport à l'autre. Laissons maintenant les bobines immobiles et ajoutons dans le circuit <i>b</i>, un interrupteur qui permet d'ouvrir ou de fermer le circuit.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lorsqu'on ferme le circuit <i>b</i>, on observe une déviation de l'aiguille de l'ampèremètre dans le circuit <i>a</i>.</li> <li>▪ Lorsque le circuit <i>b</i> reste fermé, on ne mesure plus aucun courant dans le circuit <i>a</i>.</li> <li>▪ Lorsque ensuite on ouvre le circuit <i>b</i>, on observe dans le circuit <i>a</i> de l'aiguille de l'ampèremètre dans l'autre sens.</li> </ul>	 <p style="text-align: center;"><b>Figure 36-05</b></p>

<p>6) Utilisant un montage similaire à celui décrit par l'expérience 5, plaçons maintenant les axes des deux bobines à <math>90^\circ</math> l'un par rapport à l'autre. Lorsqu'on ferme ou qu'on ouvre le circuit raccordé au générateur aucun courant n'est mesuré par l'ampèremètre</p>	 <p>Figure 36-06</p>
<p>7) Au voisinage de la bobine raccordée à l'ampèremètre, plaçons un barreau droit aimanté dans le prolongement de l'axe de la bobine et faisons le tourner d'un quart de tour autour d'un axe vertical. Au cours de ce mouvement, l'ampèremètre indique le passage d'un courant. Notons qu'on peut réaliser une expérience équivalente en remplaçant l'aimant par une bobine parcourue par un courant ou encore en gardant le barreau aimanté fixe et en faisant tourner la bobine de <math>90^\circ</math> par rapport à l'axe de l'aimant.</p>	 <p>Figure 36-07</p>
<p>8) Disposons maintenant la bobine entre les deux pôles d'un aimant en U de telle manière que l'axe de la bobine coïncide avec la ligne des deux pôles de l'aimant.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lorsque la bobine est immobile, on ne mesure aucun courant.</li> <li>▪ Lorsqu'on retire partiellement la bobine de l'entrefer, on constate l'apparition d'un courant dans le circuit.</li> <li>▪ Lorsqu'on rentre à nouveau la bobine dans l'entrefer, on mesure à l'ampèremètre un courant de sens contraire.</li> </ul>	 <p>Figure 36-08</p>

### 6.1.1.4 Conclusions

*Pour qu'il y ait un courant induit dans un circuit, il faut qu'il y ait*

- *Soit modification de la grandeur du champ magnétique traversant la spire.*
- *Soit modification de la surface  $S$  traversée par les lignes du champ magnétique (expérience 8)*
- *Soit modification de l'orientation du champ magnétique  $B$  par rapport à la spire (expérience 7)*

## 6.1.2 Notion de flux magnétique $\Phi$

### Définition

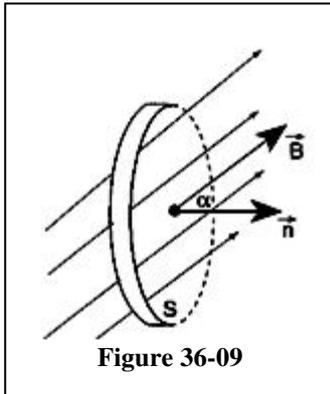


Figure 36-09

Le flux d'induction magnétique à travers une surface  $S$  représente la quantité de magnétisme qui traverse cette surface  $S$  (Fig. 36-09)

$\Phi$	Flux d'induction magnétique, en $Wb$
$B$	Induction magnétique, en $T$
$S$	Surface traversée par $\vec{B}$ , en $m^2$
$\alpha$	Angle entre $\vec{B}$ et $\vec{n}$ vecteur normal à la surface

$$\Phi = B.S.\cos\alpha$$

Si  $\alpha = 0^\circ$ , alors  $B$  est  $\perp$  à  $S$  et  $\Phi_{\max} = B \cdot S$

Si  $\alpha = 90^\circ$ , alors  $B$  est  $//$  à  $S$  et  $\Phi_{\min} = 0$

Attention : Si le circuit comprend  $N$  spires, alors  $\Phi$  à travers le circuit est :

$$\Phi = N.B.S \cos\alpha$$

où  $B$  est le champ créé par une spire

Dans ce cas d'un solénoïde :  $B = \mu \frac{I}{l}$  pour une spire et  $\alpha = 0$ .

Alors :  $\Phi = \mu \frac{N}{l} S.I$

Le flux  $\Phi$  s'exprime en Weber ( $Wb$ ).

### Exemple

Quel est le flux magnétique que traverse une spire circulaire de  $1\text{ cm}$  de rayon placée dans un champ d'induction magnétique de  $0.1\text{ T}$  et disposé perpendiculairement à la direction du champ magnétique ?

### Solution

Il suffit d'appliquer la définition :

$$\Phi = B.S.\cos\alpha = 0.1 \times \pi \times 0.01^2 \times 1 = 3.14 \times 10^{-5}\text{ Wb}$$

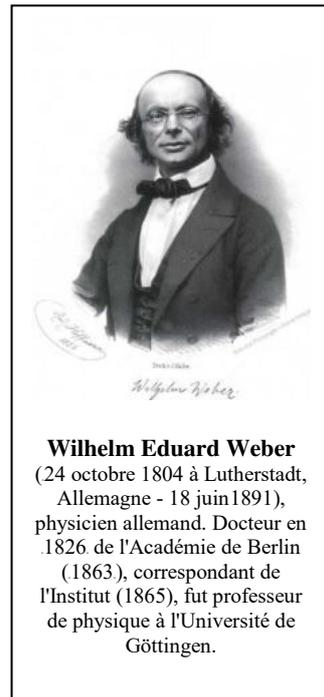
### Exemple

Quel est le flux magnétique au sein d'un solénoïde de section  $0.01\text{ m}^2$ , de  $20\text{ cm}$  de long, comportant 100 spires, parcouru par un courant de  $0.5\text{ A}$  et ayant un noyau de fer de permittivité relative de 500 ?

### Solution

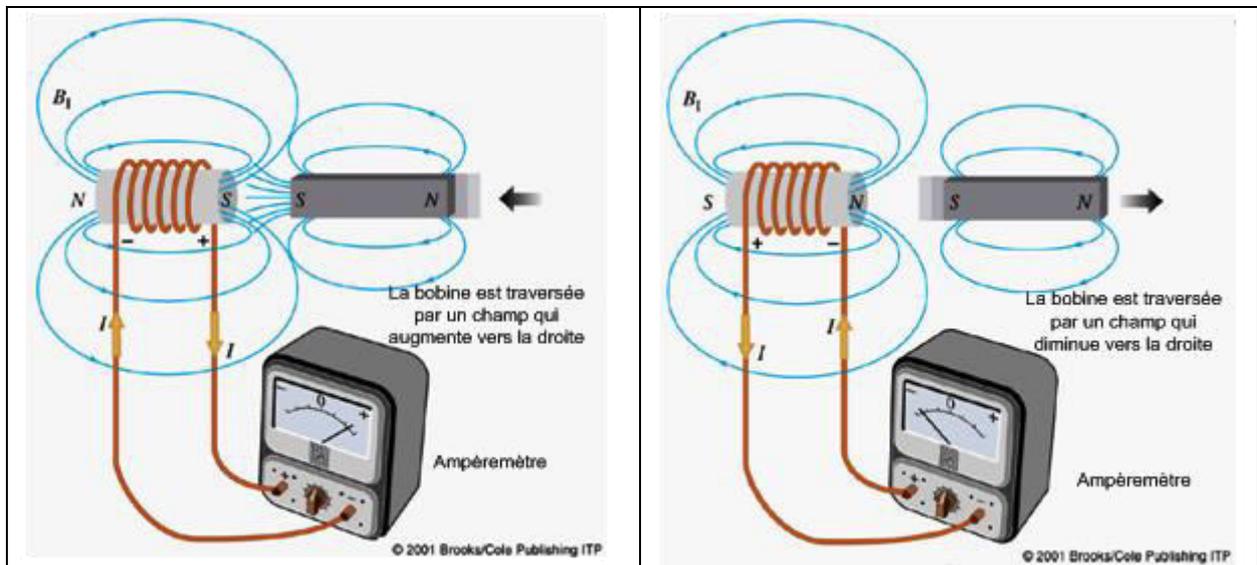
Pour une spire :  $B = \mu_r \mu_0 \frac{I}{l} = 500 \times 4\pi \times 10^{-7} \frac{0.5}{0.2} = \pi \times 10^{-6}\text{ T}$

Le flux est alors pour 100 spires :  $\Phi = NBS = 100 \times \pi \times 10^{-6} \times 0.01 = \pi \times 10^{-6}\text{ Wb} = 3.14\ \mu\text{Wb}$



### 6.1.3 Synthèse sur la production de courant induit

Pour qu'il y ait création d'un courant induit dans un circuit, il faut que celui-ci soit soumis à une variation de flux  $\Phi$ . Ce courant ne dure que pendant cette variation de flux  $\Delta\Phi$



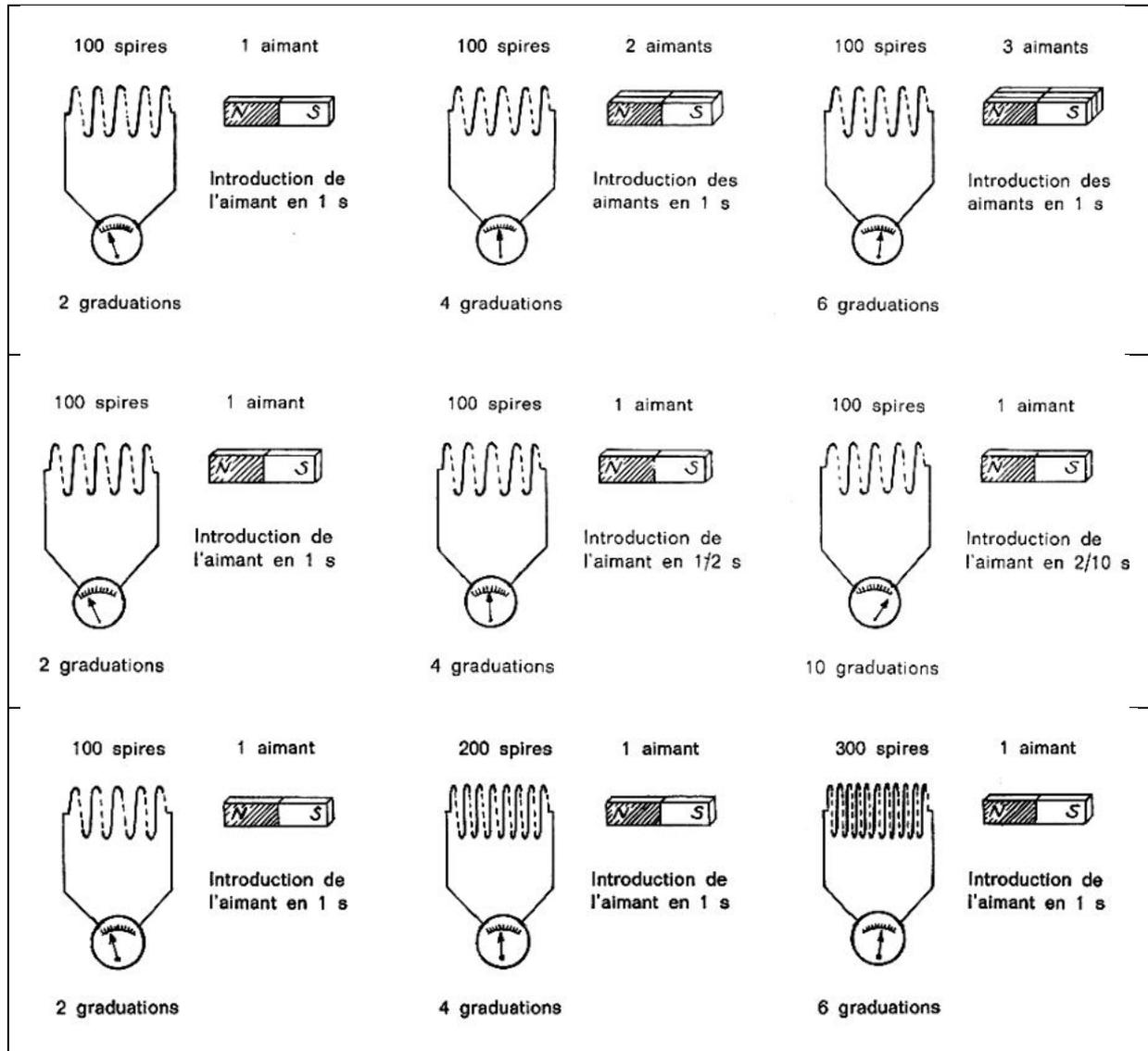
**Figure 36-10.** Une bobine vide un ampèremètre et une tige aimantée. (a) Si l'on approche le pôle S de la bobine, une tension électromotrice est induite avec des bornes (+) à droite et (-) à gauche et celle-ci produit un courant qui circule dans le sens des aiguilles d'une montre dans le circuit externe. (b) Si l'on éloigne le pôle S, on induit un courant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et une tension électromotrice avec des bornes (+) à gauche et (-) à droite. Noter la polarité des connexions à l'ampèremètre et le sens de la déviation de l'aiguille.



## 6.2 Loi de Faraday - Valeur de la tension induite E

La loi de Faraday est une loi qui permet de déterminer la grandeur de la tension induite dans le conducteur (bobine) suite à une variation de flux.

### 6.2.1 Paramètres influençant le courant induit (Fig. 36-11)



### 6.2.2 Conclusion

La d.d.p. induite  $E$  (V) qui prend naissance aux bornes d'une bobine induite est :

Proportionnelle à la variation de flux  $\Delta\Phi$  (Wb)

Inversement proportionnelle à la durée  $\Delta t$  (s) de la variation de flux

Proportionnelle au nombre  $N$  de spires de la bobine induite

$$E = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

$E$  Tension électromotrice induite (TEM), en V

$N$  Nombre de spires

$\Delta\Phi$  Variation du flux magnétique, en Wb

$\Delta t$  Durée de la variation, en s

## 6.3 Loi de Lenz

La loi de Lenz est une loi qui permet de déterminer le sens du courant induit dans la bobine induite

### 6.3.1 Loi

*Le courant induit a un sens tel que par ses effets il s'oppose à la cause qui lui a donné naissance.(d'où le signe négatif dans la loi de « Lenz – Faraday » )*

### 6.3.2 Vérification de la loi de Lenz

Chute d'un aimant dans un tube (Fig. 3-73)

#### 6.3.2.1 Expérience

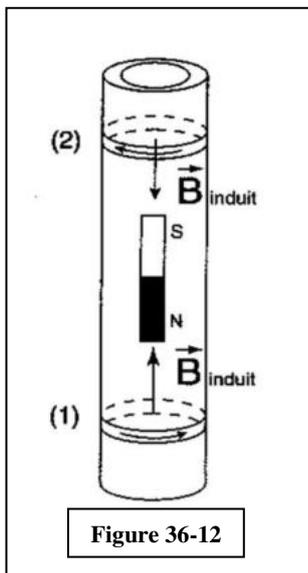


Figure 36-12

Soient deux tubes verticaux de même longueur et de même section intérieure, l'un en plastique et l'autre en cuivre. On y laisse tomber deux aimants identiques. On observe des durées de chute différentes : le retard dans le tube métallique est considérable et semble de nature à mettre en doute l'idée que dans le vide (ou dans l'air) tous les corps subissent, à un endroit donné, la même accélération due à la pesanteur.

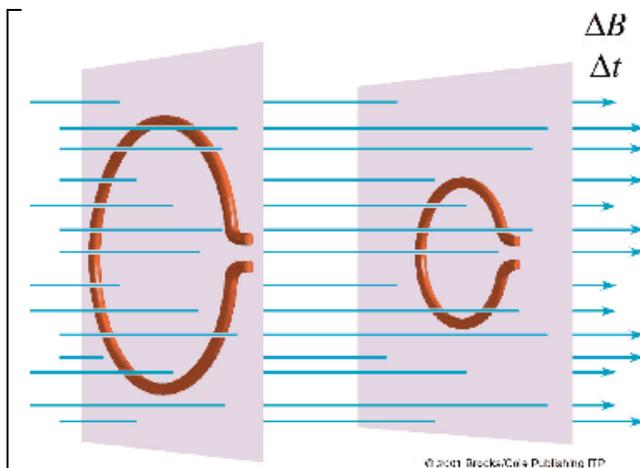
#### 6.3.2.2 Explication

La figure 36-12 représente les courants induits prenant naissance dans le tube en cuivre avant (1) et après (2) passage de l'aimant. En (1), on approche un pôle Nord de la spire correspondant à une tranche du tube en cuivre. Le courant induit est source d'un champ magnétique vertical dirigé vers le haut, qui repousse l'aimant vers le haut. En (2), le pôle Sud de l'aimant s'éloigne de la spire. Le courant induit est source d'un champ magnétique vertical et dirigé vers le bas, qui retient l'aimant vers le haut. Ainsi l'aimant est freiné tout au long de sa chute.



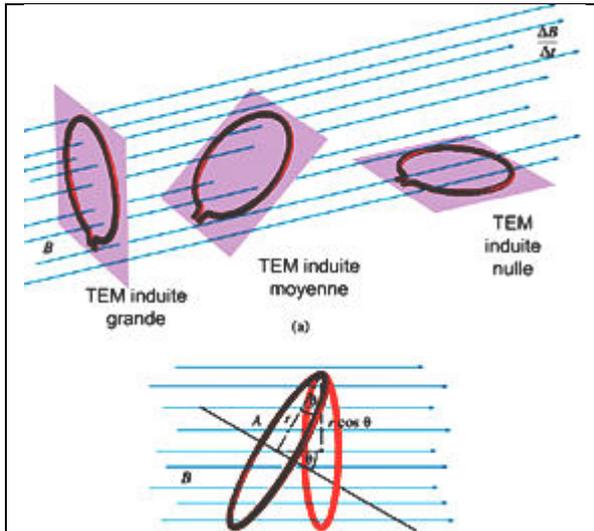
**Heinrich Friedrich Emil Lenz** est un physicien allemand d'origine russe ("balte allemand") né à Tartu (actuellement Dorpat), Estonie, le 12 février 1804 et mort à Rome le 10 février 1865. Il est professeur puis recteur à l'Université de St.-Petersbourg où il refait les expériences de Faraday. Son nom est resté attaché à la loi sur l'interaction courant électrique - champ magnétique.

### Exemple

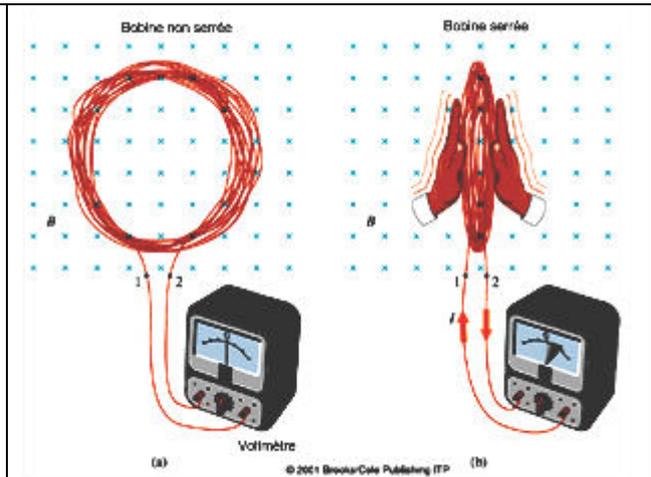


**Figure 36-13 :** Quand le champ magnétique uniforme et variable avec le temps traverse deux spires métalliques, la TEM induite est plus grande aux bornes de la plus grande spire. C'est pour tenir compte de ce phénomène que l'on préfère parler en termes de flux magnétique

**Exemple**

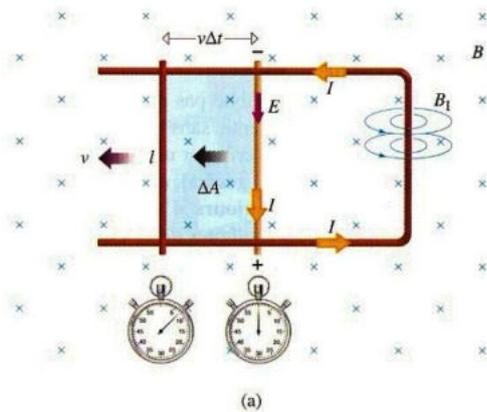


**Figure 36-14** (a) La TEM induite est proportionnelle à l'aire perpendiculaire traversée par le champ magnétique.  
 (b) L'anneau de rayon  $r$  se projette en une ellipse. Verticalement  $r$  se projette en  $r \cos \theta$  et horizontalement  $r$  se projette  $r$ . L'aire de l'anneau ( $S = \pi r^2$ ) se projette en l'aire de l'ellipse

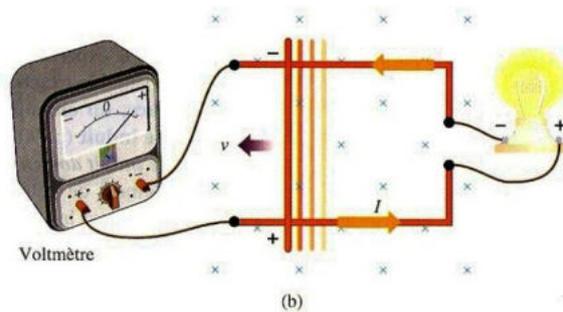


**Figure 36-15** (a) On place une bobine perpendiculairement à un champ magnétique. Elle commence au point 1 fait un certain nombre de tours dans le sens des aiguilles d'une montre et finit au point 2. (b) En serrant les spires ; on réduit  $S$ , on change ainsi le flux et une TEM est induite. Le voltmètre indique un saut momentané de la tension et retourne ensuite à zéro.

**Exemple**



**Figure 36-16 (a)(b)**



Un fil rectiligne glissant sur une tige métallique en forme d'U. (Fig. 36-16)

(a) Pendant que le fil se déplace le flux magnétique varie selon  $B \frac{\Delta S}{\Delta t} = B \frac{l \cdot v \cdot \Delta t}{\Delta t} = B \cdot l \cdot v$ .

Notez comment le champ induit  $B_i$  dans le circuit est normal à la page en direction du lecteur et s'oppose ainsi à l'augmentation du flux.

(b) Le courant circule dans le sens inverse des aiguilles d'une montre comme si la charge (une lampe) était branchée aux bornes (+) et (-) d'une pile.

**Exemple**

Une bobine plate et circulaire de 200 tours et d'aire  $100 \text{ cm}^2$  est soumise à un champ magnétique perpendiculaire et uniforme de  $0.5 \text{ T}$  qui traverse toute sa surface. Si le champ est supprimé de façon qu'il s'annule au bout de  $200 \text{ ms}$ , quelle est la TEM induite moyenne ? Si la bobine à une résistance de  $25 \Omega$ , quelle est l'intensité moyenne induite ?

**Solution**

a) Le champ magnétique  $B$  traverse perpendiculairement toute la surface de la bobine, le flux magnétique initial est donc de :  $\Phi = B.S = 0.5 \times 0.01 = 0.005 \text{ Wb}$

Le flux magnétique final sera nul. La variation de flux est donc :  $\Delta\Phi = -0.005 \text{ Wb}$ .

La TEM induite est alors de  $E = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 200 \times \frac{-0.005}{0.2} = 5 \text{ V}$

b) D'après la loi d'Ohm, l'intensité est donnée par :  $I = \frac{U}{R} = \frac{5}{25} = 0.2 \text{ A}$

## 6.4 Tension électromotrice due au mouvement

Supposons que l'on déplace un segment d'un fil conducteur ordinaire de longueur  $l$  perpendiculairement à un champ magnétique uniforme à la vitesse  $v$ . (Fig 36-17). Les porteurs de charges mobiles sont alors entraînés avec le fil à la même vitesse  $v$  vers la droite. En se déplaçant, ils subissent une force électromagnétique dont le sens est donné par la règle de la main gauche. Les électrons seront poussés vers le bas. Ce segment se comporte alors comme une pile et par conséquent, il se produit une TEM induite à travers le fil, dont l'extrémité supérieure se retrouve à un potentiel plus élevé que l'extrémité inférieure. On montre facilement que :

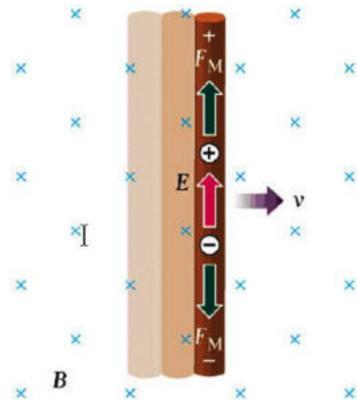
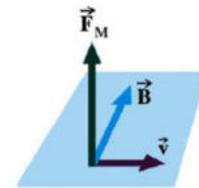


Figure 36-17

$E = B.l.v$	$E$	TEM induite, en $V$
	$B$	Induction magnétique, en $T$
	$l$	Longueur, en $m$
	$v$	Vitesse, en $m/s$



### Exemple

Un fil de longueur 1 m tenu horizontalement dans la direction est-ouest est lâché à un endroit où le champ magnétique terrestre est égal à  $2 \times 10^{-5} \text{ T}$  et dirigé vers le nord. Déterminez la TEM induite après 4 s de chute.

**Solution**

Nous avons d'abord besoin de trouver la vitesse.  $v = v_0 + gt = 0 + 9.81 \times 4 = 39.2 \text{ m/s}$

Alors :  $E = vBl = 39.2 \times 2 \times 10^{-5} \times 1 = 0.78 \text{ mV}$

## 6.5 Applications des courants induits

### 6.5.1 Le microphone

#### Schéma

- Organes de base (Fig. 36-18) :
  - un aimant
  - une bobine assemblée à une membrane (+ grille de protection)
- l'aimant : permet de créer un champ magnétique  $B$

- bobine : peut se déplacer parallèlement à l'axe de l'aimant.

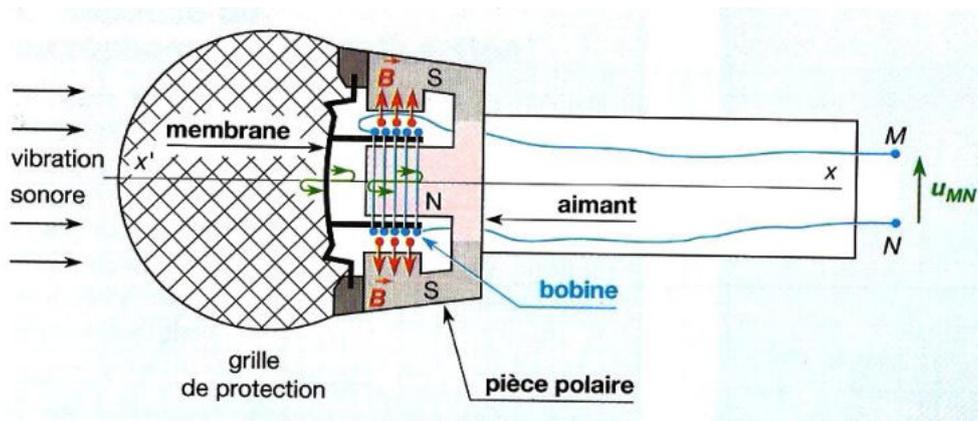


Figure 36-18

Lorsque la membrane reçoit, à travers la grille, une vibration sonore, elle entre en vibration. Ce mouvement est automatiquement transmis à la bobine. Celle-ci se déplace au voisinage de l'aimant et il se crée un courant induit dans cette bobine. Celui-ci est récupéré par deux fils et amener vers un amplificateur.

Si la membrane reçoit un son de fréquence  $f$ , le mouvement de la bobine est aussi de fréquence  $f$  tout comme le courant produit.



*Le microphone transforme un son en un courant alternatif de même fréquence.*

### 6.5.2 Tête de lecture de magnétophone

Une bande magnétique supporte des particules aimantées sur toute sa longueur. D'un endroit cette aimantation varie en fonction de l'enregistrement : lorsque la bande défile devant la tête de lecture, une petite bobine de fil conducteur, une tension électromotrice très faible est induite à ses bornes. Un dispositif électronique amplifie alors cette tension. Un principe similaire est appliqué dans la conception des lecteurs de disquettes informatiques. (Figure 36-19)

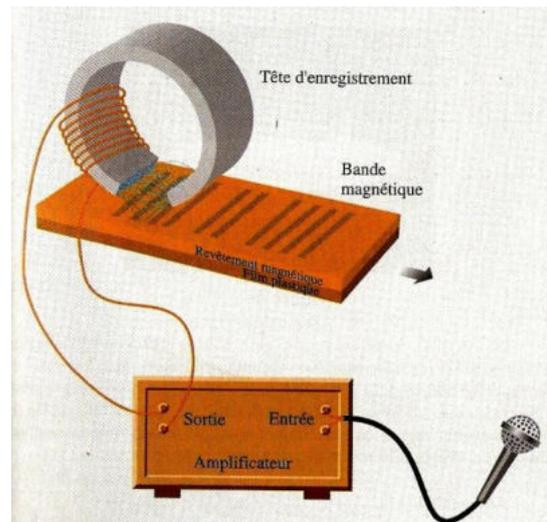
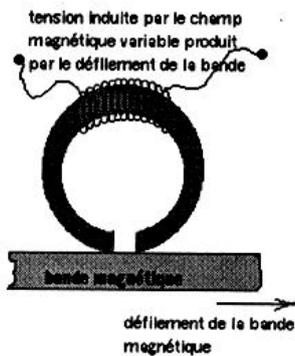


Figure 36-20

Pour l'enregistrement, le système fonctionne à l'envers.

### 6.5.3 La magnéto de vélo

Lorsque le cycliste pédale, la molette solidaire de l'aimant central frotte contre la roue en mouvement. Il apparaît ainsi une variation du flux magnétique à travers la bobine fixe entourant l'aimant et donc un courant induit. Plus le cycliste roule vite, plus la variation de flux est rapide et plus l'intensité du courant induit est grande. (Fig. 36-21)

Nous comprenons maintenant comment la rotation d'un aimant (inducteur) à l'intérieur d'une bobine (induit) peut entraîner l'apparition d'un courant de manière à faire briller les deux phares du vélo.

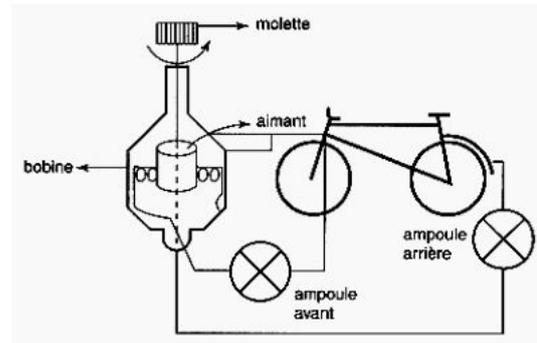
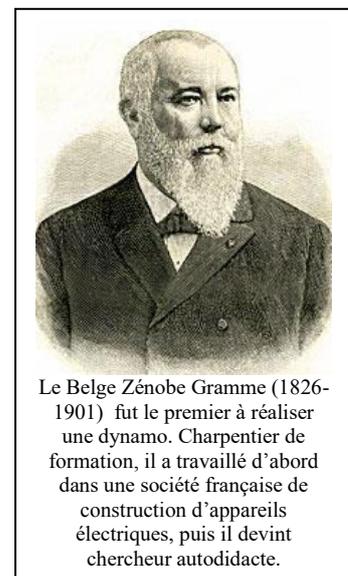


Figure 36-21

Dans le cas de la magnéto dessinée ci-dessus, l'inducteur tournant est un aimant permanent. Ces dispositifs installés sur les bicyclettes sont souvent improprement appelés « dynamos ».

Pour corriger cette idée incorrecte, rappelons que le mot « dynamo » s'oppose à « magnéto » par le fait que la dynamo, l'inducteur est un bobinage alors que pour la magnéto, l'inducteur est un aimant. L'inducteur bobiné d'une dynamo est fixe ; il induit dans les bobinages du rotor des courants alternatifs redressés mécaniquement par un collecteur et des balais sur lesquels on recueille les courants continus produits.

Le belge Zénobe Gramme est l'inventeur de la dynamo qui de nos jours sont essentiellement utilisées dans les voitures pour recharger les batteries.



Le Belge Zénobe Gramme (1826-1901) fut le premier à réaliser une dynamo. Charpentier de formation, il a travaillé d'abord dans une société française de construction d'appareils électriques, puis il devint chercheur autodidacte.

La figure 36-22 est un exemple de dynamo où l'inducteur est un aimant fixe. En faisant tourner le disque de cuivre dans le sens indiqué, les porteurs de charge se déplacent à une vitesse  $v$ . Ils subissent alors une force radiale vers la périphérie du disque dans le cas de porteurs positifs ou vers le centre dans le cas de porteurs négatifs. (Il suffit d'appliquer la règle de la main gauche). Dans les deux cas, un courant vers la périphérie du disque est produit. Ce dispositif est un générateur de courant continu, qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique.

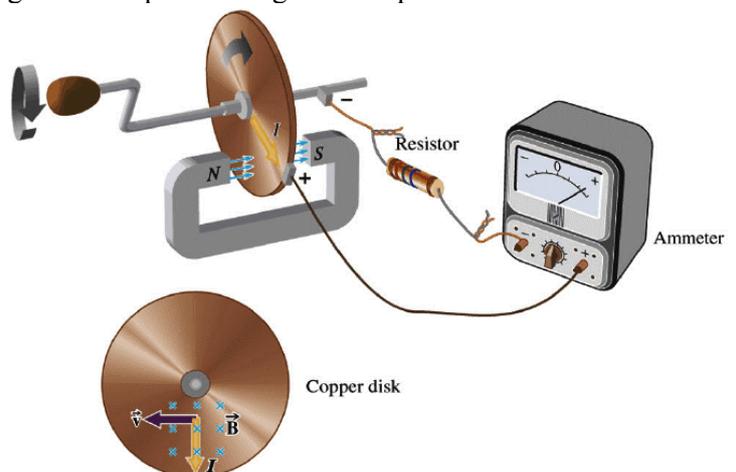


Figure 36-22

© 2001 Brooks/Cole Publishing ITP

### 6.5.4 Les courants de Foucault

Le courant induit est plus important lorsque la résistance des conducteurs est très faible (Loi d'Ohm :  $I = E / R$ ). C'est le cas de conducteur de grosse section et des conducteurs massifs.

*Les courants induits dans des conducteurs massifs s'appellent courants de Foucault.*

#### a) Echauffement d'un corps métallique

##### Four à induction

Dans un four à induction, un corps conducteur est chauffé en le plaçant à l'intérieur d'un bobinage parcouru par un courant alternatif de haute fréquence. (Fig. 36-23) L'usage de la haute fréquence (HF) permet de créer des variations de flux très rapides et donc des courants induits intenses.

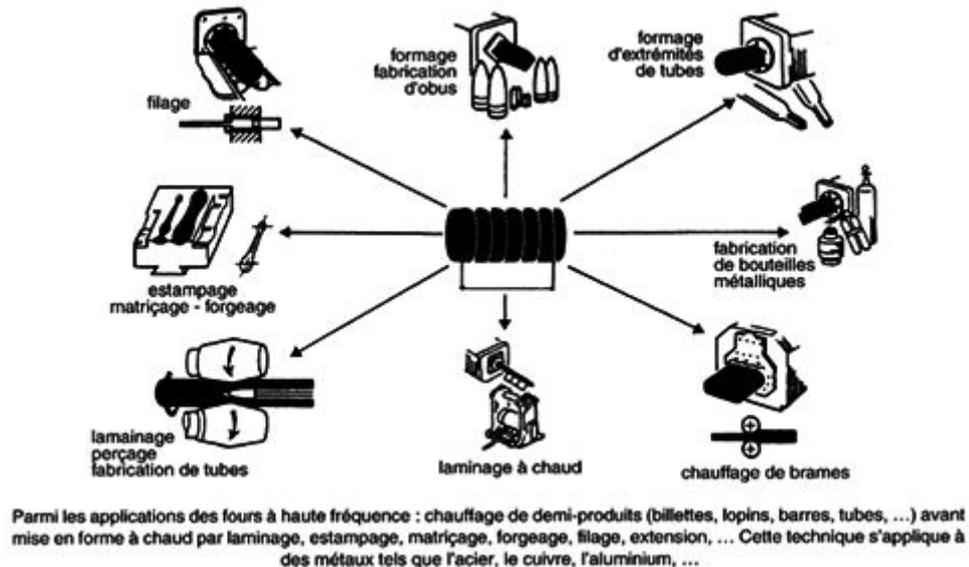


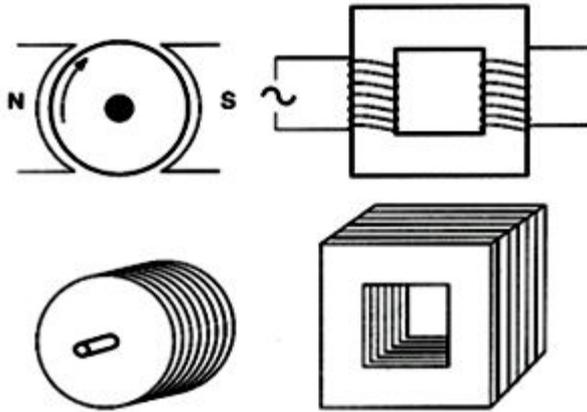
Figure 36-23

##### Cuisinière à induction.

Dans l'appareil de cuisson, un circuit électrique alimente une bobine appelée inducteur, placée sous la zone de cuisson. Cet inducteur crée un très fort champ magnétique variable. Lorsqu'on place un récipient conducteur sur la plaque vitrocéramique, il se crée dans le fond de celui-ci un courant induit. C'est celui-ci qui chauffe le fond du récipient et indirectement, chauffe les aliments contenus dans le récipient. (Fig. 36-24)



Figure 36-24 : Principe de fonctionnement d'une plaque à induction. Une bobine située sous la plaque engendre un champ magnétique variable. Des courants de Foucault s'établissent alors dans le fond de la casserole, qui s'échauffe par effet Joule.



**Figure 36-25 :** Le rotor d'un moteur électrique (à gauche) et le noyau de fer d'un transformateur sont constitués de tôles isolées dont le plan est constamment parallèle aux lignes du champ magnétique

**Moteur électrique et transformateur**

Dans le cas du moteur électrique et du transformateur, cet échauffement est indésirable. Pour le diminuer fortement, on peut « feuilleter » le corps conducteur : tôles minces, empilées, isolées les unes des autres et disposées parallèlement aux lignes de champ (Fig. 3-86). A travers ces surfaces conductrices, le flux magnétique est constamment nul et il n'y a donc plus de courant de Foucault.

**b) Forces de freinage (dans le cas où le corps conducteur est en mouvement dans le champ magnétique)**

Le freinage est dû aux forces électromagnétiques exercées par le champ sur le courant induit.

Faisons osciller un pendule constitué d'une plaque d'un métal non magnétique, tel que l'aluminium ou le cuivre, qui passe dans l'entrefer d'un électroaimant. (Fig. 36-26, a et b)

Si aucun courant ne passe dans l'électroaimant, le pendule oscille librement. Si le courant passe dans l'électroaimant, le mouvement est très vite amorti et les oscillations s'arrêtent très rapidement. En effet, à mesure que la plaque entre dans l'entrefer, elle est traversée par un flux croissant (en valeur absolue) donnant lieu à des courants de Foucault circulant dans le corps conducteur dans le sens anti-horlogique, de manière à créer un champ magnétique induit qui s'oppose à l'augmentation du flux. Ce courant induit subit une force électromagnétique qui produit le freinage lorsque la plaque entre dans l'entrefer de l'électroaimant.

Lorsqu'à l'autre extrémité de l'oscillation, la plaque sort du champ, les courants induits qui résultent de la diminution du flux vont dans l'autre sens. Il s'ensuit encore un freinage.

Ces courants de Foucault sont utilisés dans de nombreux cas comme dispositifs de freinage. (Fig. 36-27)

Figure 36-26 (a)

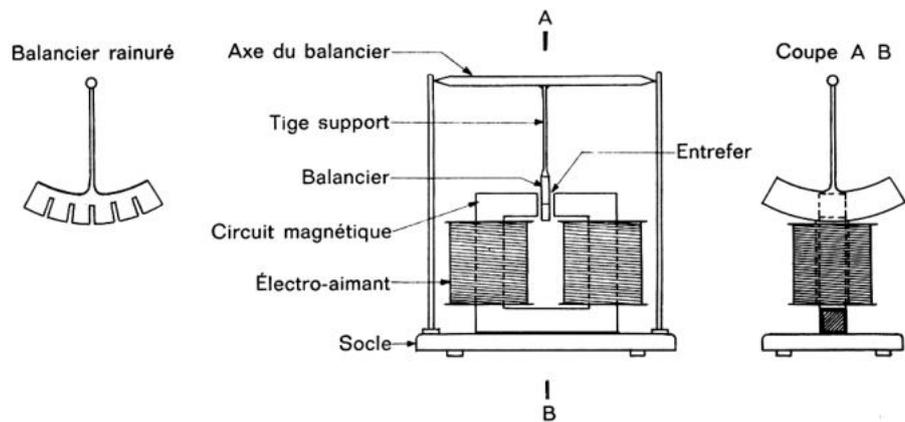
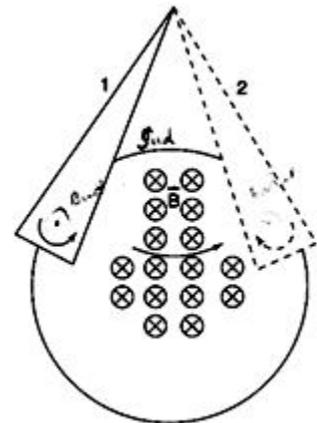


Figure 36-26 (b)

La rotation, à travers l'électroaimant, du disque métallique couplé à l'axe des roues, engendre des courants de Foucault dans le disque, ce qui provoque le freinage. Plus la vitesse est grande, plus la variation de flux est rapide et plus les courants induits sont intenses.

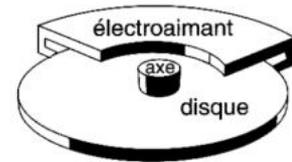


Figure 36-27

La force de freinage augmente donc avec la vitesse du camion, contrairement aux freins ordinaires. C'est un intérêt majeur des freins magnétiques.

**Figure 36-28** : Un disque de cuivre en tournant dans un champ magnétique perpendiculaire. Des boucles de courant de Foucault sont induites dans le disque. Ces courants circulent dans des sens tels que l'action que le champ extérieur  $B$  exerce sur eux, importante dans la région centrale, freine la rotation du disque

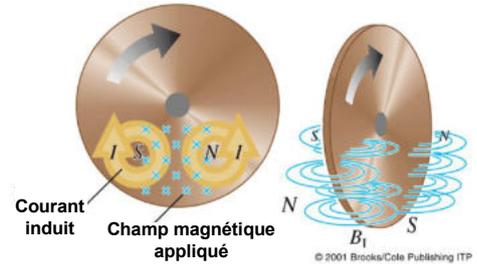


Figure 36-28

## 6.6 Auto-induction ou self induction

### 6.6.1 Expérience.

Soit une bobine de 1200 spires contenant un noyau de fer et raccordée à une ampoule de poche  $L_1$  (3.5 V, 0.2 A ou 6.3 V, 0.3 A). Soit  $I_1$  l'intensité du courant qui la fait briller. En parallèle, plaçons une ampoule  $L_2$  identique et soit  $I_2$  l'intensité du courant dans cette partie du circuit. Le tout est alimenté par un générateur de tension continue et le circuit peut être ouvert ou fermé grâce à un interrupteur. (Fig. 36-29)

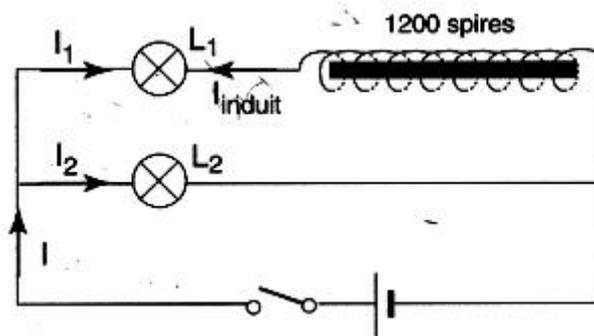


Figure 36-29

### 6.6.2 Observations

Lors de la fermeture du circuit grâce à l'interrupteur, l'ampoule  $L_1$  s'allume en retard par rapport à l'ampoule  $L_2$ .

Lors de l'ouverture du circuit on observe un vif éclat de la lampe  $L_1$  avant de s'éteindre.

### 6.6.3 Explication

A la fermeture du circuit, le flux à travers la bobine augmente. Il apparaît aux bornes de la bobine une différence de potentiel induite.

$$U = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

La bobine est un générateur temporaire, source d'une différence de potentiel de signe opposé à celui de la différence de potentiel qui existe aux bornes de l'alimentation du circuit principal. Il en résulte,

pendant un certain temps, un courant induit  $I_{\text{induit}}$  qui s'oppose au courant  $I_1$ . Ce qui permet d'expliquer que pendant quelques instants, le courant n'est pas assez intense pour faire briller  $L_1$ .

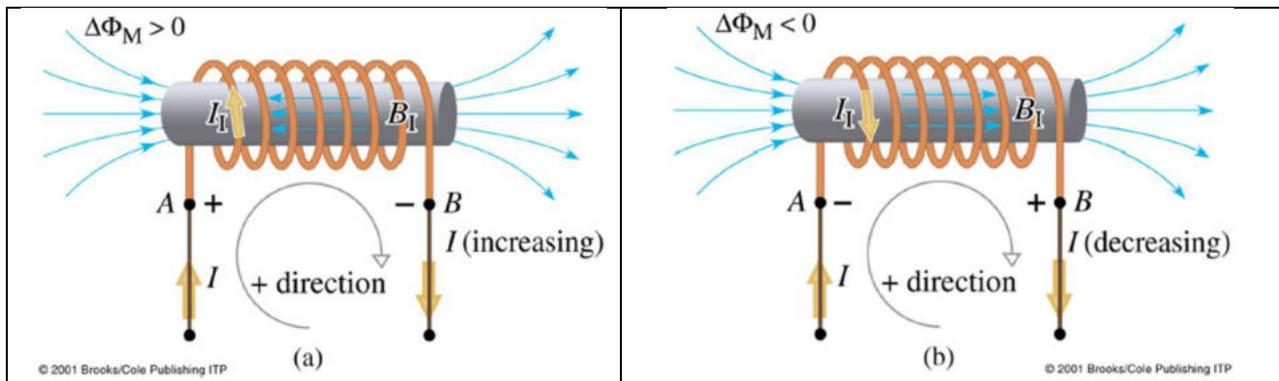
A l'ouverture du circuit, la diminution du flux magnétique dans la bobine entraîne une différence de potentiel induite et donc un courant induit qui s'oppose à la diminution, donc qui s'ajoute au courant existant dans cette partie du circuit. Les intensités des deux courants s'additionnent pendant un court instant, ce qui explique l'éclat vif de l'ampoule  $L_1$  avant de s'éteindre.

### 6.6.4 Conclusion.

*Une différence de potentiel induit apparaît aux bornes d'un circuit chaque fois que l'intensité du courant varie. Ce phénomène est appelé self-induction ou auto-induction. Avec un générateur de tension continue, ceci ne se produit qu'à l'ouverture ou à la fermeture du circuit.*

$$U = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

$U$	Tension électromotrice self-induite, en V
$N$	Nombre spires
$\Delta\Phi$	Variation de flux magnétique, en Wb
$\Delta t$	Variation de temps, en Ms



**Figure 36-30** (a) Lorsque  $I$  augmente un courant induit  $I_1$  s'oppose à cette augmentation et une TEM d'autoinduction négative (une chute de potentiel) apparaît entre les bornes. (b) Lorsque  $I$  diminue  $I_1$  s'oppose à cette diminution et une TEM d'autoinduction positive (une augmentation de potentiel) apparaît entre les bornes.

### 6.6.5 Coefficient de self induction d'une bobine

Un courant d'intensité  $I$  circulant dans une bobine produit un champ magnétique  $\vec{B}$  proportionnel à  $I$

$$B = \mu \frac{N}{l} I$$

Ce champ magnétique traverse toutes les spires de la bobine créant ainsi un flux magnétique

$$\Phi = NBS \cos \alpha \text{ (ici, } \cos \alpha = 1).$$

Donc :  $\Phi = N\mu \frac{N}{l} I.S$  et si on pose :

$$L = \mu \frac{N^2}{l} S$$

Alors on peut écrire :

$$\Phi = L.I$$

Le coefficient de proportionnalité  $L$  ne dépend que des caractéristiques de la bobine et est appelé **coefficient de self-induction** ou encore **inductance** de la bobine.

On voit que lorsque  $I$  varie, le flux varie, créant une différence de potentiel self-induite telle que :

$$U_{\text{induite}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$U_{\text{induite}}$	TEM auto-induite, en $V$
$L$	Inductance de la bobine, en $H$
$\Delta I$	Variation du courant, en $A$
$\Delta t$	Variation du temps, en $s$

### Unité de coefficient de self-induction ou d'inductance

L'unité de coefficient de self-induction dans le système international des unités est le **henry (H)**

**Un circuit a un coefficient de self-induction d'un henry si une variation d'intensité du courant d'un ampère du courant d'un ampère en une seconde produit une différence de potentiel d'un volt.**

### Exemple

L'antenne d'un poste de radio est constitué d'un solénoïde de 3.0 cm de longueur, de section 0.50 cm<sup>2</sup> et comprenant 300 tours de fils de cuivre fin enroulé en une seule couche. Le champ magnétique de l'onde électromagnétique à capter oscille dans la bobine et induit une TEM que traite le circuit du poste de radio. (a) Déterminer l'inductance du solénoïde, s'il est vide. (b) Qu'elle est la valeur approchée de l'inductance, si on enroule le solénoïde d'un cylindre de ferrite de perméabilité relative d'environ 400, lorsque le solénoïde porte le courant prévu ?

#### Solution

(a) L'inductance se calcul en appliquant la formule :

$$L = \mu \frac{N^2}{l} S = 4\pi \times 10^{-7} \frac{300^2}{0.03} \times 0.5 \times 10^{-4} = 0.19 \text{ mH}$$

(b) Si  $\mu = 400 \mu_0$ , alors  $L$  est simplement multiplié par 400 :  $L = 75 \text{ mH}$

### Exemple

Le courant dans une bobine de 50  $\mu H$  et de résistance négligeable augmente de 0 à 2 A en 0.10 s. Déterminer la TEM self-induite moyenne entre ses bornes.

#### Solution

Appliquons la formule :  $U_{\text{induite}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -50 \times 10^{-6} \times \frac{2}{0.1} = -1.0 \text{ mV}$

### Remarque 1

*La self-induction est une propriété des bobines à s'opposer à toute variation de courant qui la parcourt.*

*Ce phénomène entraîne des étincelles aux couteaux des interrupteurs ainsi qu'aux prises de courant lorsqu'on retire la prise d'un appareil électrique.*

*Un tel circuit appelé inducteur s'oppose à un courant qui varie beaucoup. Il gêne donc très fort le passage d'un courant dit alternatif mais ne s'oppose en rien au passage d'un courant continu. Ces inducteurs sont utilisés pour séparer un courant alternatif d'un courant continu.*

### Remarque 2

L'inductance donnée par la formule  $L = \mu \frac{N^2}{l} S$  ne donne qu'une valeur approchée car on néglige les effets de bords : le module du champ magnétique diminue et son orientation change sur toute la section au voisinage d'une extrémité. L'inductance réelle d'un solénoïde est donc inférieure à la valeur donnée par la formule. Si on souhaite avoir une valeur exacte, le plus simple est de la déterminer expérimentalement.

## 7. Les courants alternatifs

### 7.1 Production

Nous avons vu que lorsqu'un aimant pénètre dans une bobine une tension induite apparaît. Les expériences de base sur la production des courants induits nous ont montré que la tension ou différence de potentiel induite dans la bobine changeait de sens régulièrement au fur et à mesure que le mouvement se reproduit. (Fig 37.01)

L'allure de la tension induite dans la bobine peut être visualisée sur un oscilloscope. (Fig 37.02)

Un oscilloscope est un appareil électronique qui retrace sur un écran, la forme mathématique de la tension qu'on lui applique à l'entrée.

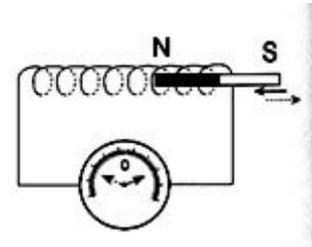


Figure 37.01

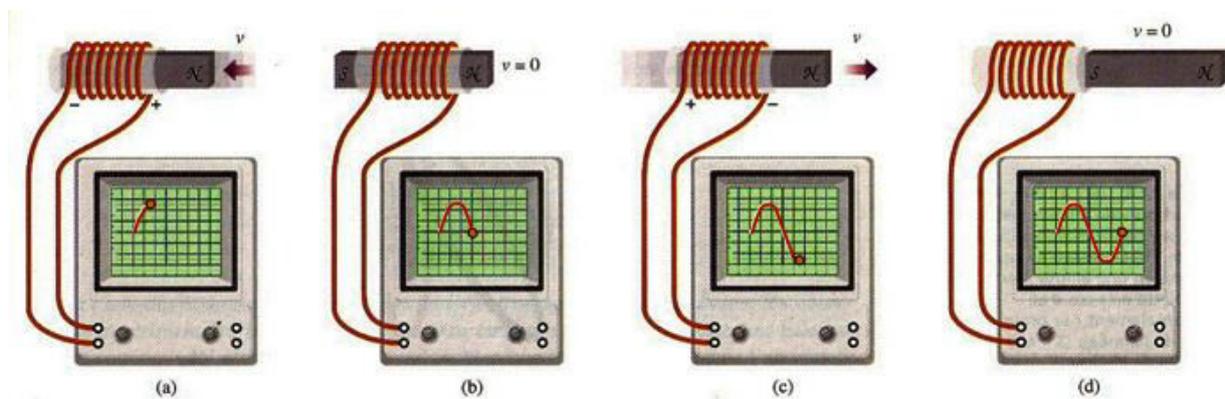


Figure 37.02

#### 7.1.1 Définitions

*Une tension qui change régulièrement de sens est appelée « tension alternative » ; elle produit un courant alternatif dans un circuit électrique fermé.*

*Lors du mouvement complet de l'inducteur ou de l'induit, la tension passe par toutes les valeurs qu'il est possible de produire ; on dit qu'elle décrit un cycle*

*La durée d'un cycle complet est appelée période du courant alternatif. Son symbole est  $T$  et elle se mesure en seconde (s)*

*Le nombre de cycles par seconde est appelé fréquence. Son symbole est  $f$  et elle se mesure en Hertz (Hz)*

#### 7.1.2 Tension induite

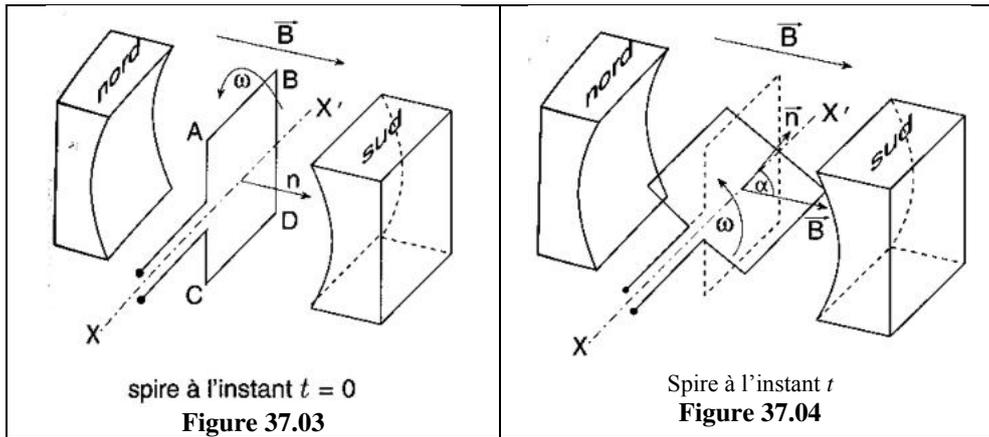
##### Etude mathématique

Soit une spire  $ABCD$ , tournant à vitesse angulaire  $\omega$  constante autour d'un axe  $XX'$ .

La spire de surface  $S$  est placée dans un champ magnétique  $\vec{B}$  uniforme et perpendiculaire à l'axe  $XX'$ .

En  $t = 0$ , le plan de la spire est vertical. (Fig. 37.03). A l'instant  $t$ , elle occupe une position telle que  $\alpha = \omega t$ . (Fig. 37.04)

Le flux traversant la spire est :  $\Phi = B.S.\cos\alpha = B.S.\cos\omega t$



En fonction du temps, le flux varie constamment et il se produit dans la spire une différence de potentiel induite donnée par la formule de « Lenz-faraday » avec  $N = 1$  :  $E = U = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$

Si on regarde la valeur instantanée de cette tension, on doit prendre des  $\Delta t$  de plus en plus petits

$$U(t) = -\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'(t)$$

Où  $\Phi'(t)$  est la dérivée de  $\Phi(t)$  par rapport au temps.

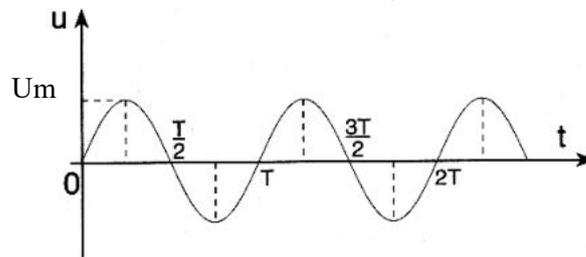
Par conséquent :  $U(t) = -(BS \cos \omega t)' = -BS\omega \sin \omega t$

Pour une bobine de  $N$  spires :  $U(t) = N; B.S.\omega.\sin \omega t$

La différence de potentiel induite est donc une fonction sinusoïdale du temps dont la valeur maximale est :  $U_m = N.B.S.\omega$ . En définitive :

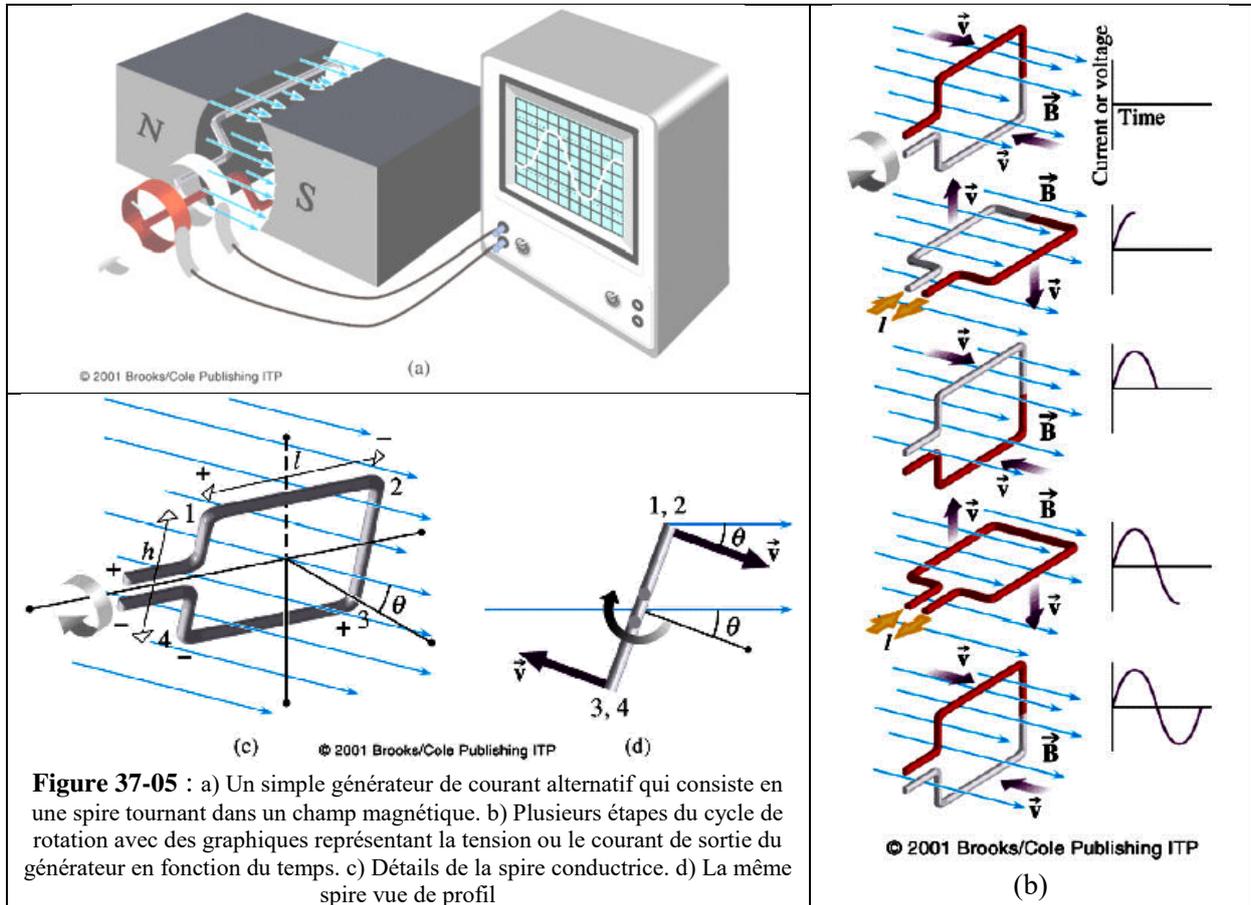
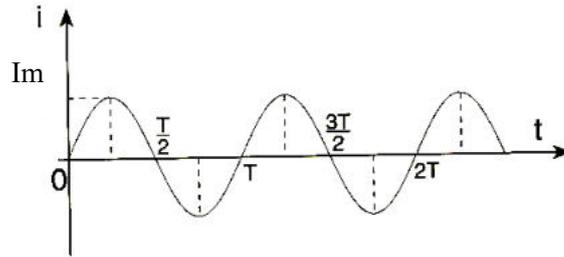
$$U(t) = U_m \sin \omega t \quad \text{avec} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

**La tension alternative est une fonction sinusoïdale du temps**



Si le circuit est fermé, il apparaîtra un courant d'intensité sinusoïdale

$$I(t) = I_m \cdot \sin \omega t$$



### Définitions

Un courant d'intensité variable est dit périodique quand son intensité se reproduit identique à elle-même au bout d'intervalle de temps appelé période  $T$

Un courant est alternatif si son intensité reprend la même valeur changée de signe chaque fois que le temps augmente d'une demi-période.

$I(t)$  ou  $I =$  intensité instantanée (idem pour  $U(t)$  et  $U$ )  
 $I_m =$  intensité maximale ou amplitude du courant (idem pour  $U_m$ )  
 On appelle  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f =$  pulsation du courant  
 $f =$  fréquence du courant en Hz  
 $T =$  période du courant en s avec  $T = \frac{1}{f}$

Les courants alternatifs les plus fréquents sont les courants sinusoïdaux dont l'intensité est une fonction sinusoïdale du temps.

## Remarques

- Courants industriels  $f = 50$  Hz en Europe  $f = 60$  Hz aux Etats-Unis
- Courants basses fréquences de 100 Hz à 10000 Hz
- Courants hautes fréquences de  $10^4$  Hz à  $10^9$  Hz
- Courants d'hyperfréquences de  $10^9$  Hz à  $10^{11}$  Hz

## Exemple

Un générateur est formé par une seule bobine qui tourne à la fréquence de 50 Hz dans un champ magnétique de 0.40 T. Sachant que la bobine est formée de 10 tours chacune d'aire  $1200 \text{ cm}^2$ , quelle est la valeur maximale de la tension électromotrice ?

## Solution

La valeur maximale de la tension électromotrice est l'amplitude de la tension  $U_m$  :

$$U_m = NBS\omega = NBS \cdot 2\pi f = 10 \times 0.40 \times 1200 \times 10^{-4} \times 2 \times \pi \times 50 = 151 \text{ V}$$

## 7.1.3 Les alternateurs industriels

Si on veut obtenir une amplitude de courant appréciable, il ne faut pas prendre une spire mais un grand nombre et les faire tourner rapidement dans un champ magnétique intense.

Un alternateur industriel est un générateur de courants alternatifs d'intensité très grande.

Il en résulte un important dégagement de chaleur (effet Joule) ce qui nécessite un refroidissement important.

Comme il est plus facile de refroidir un système fixe qu'un système mobile, l'alternateur se compose (Fig. 37-06) :

- **d'un rotor** (= partie mobile centrale de l'alternateur) qui est un électro-aimant (*joue le rôle de l'aimant*)
- **d'un stator** (= partie fixe extérieure) dans lequel se crée le courant induit (*joue le rôle de la bobine*)

(Voir schéma)

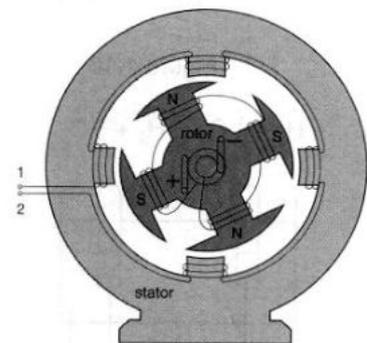
En pratique le mouvement du rotor dans le stator est obtenu grâce à une turbine

## Les turbines

**D'une manière générale, une turbine est une machine qui sert à transformer l'énergie due au mouvement d'un fluide qui s'écoule.** Elle comporte une ou plusieurs roues portant des aubes ou des ailettes sur lesquelles le fluide exerce une pression qui en provoque la rotation.

**Le fluide peut-être de l'eau, de la vapeur ou de l'air**

Figure 37-05





**Figure 37-06 :** Exemple d'alternateur de forte puissance (partie bleue claire du Groupe turbo-alternateur) 1300 MW - 1500 /min - 50 Hz triphasé au premier plan la partie excitation et réglage de puissance

## 7.2 Les effets du courant alternatif

### 7.2.1 Effet chimique

Chimiquement, le courant continu est utilisé pour les électrolyses. (*Voir cours de chimie*) Rappelons que le courant alternatif correspond au mouvement des électrons dans un sens pendant une demi-période et au mouvement de ces mêmes électrons dans l'autre sens pendant la seconde demi - période.

Ceci signifie que les produits de l'électrolyse qui apparaissent à l'anode et à la cathode sont constamment mélangés lors de leur production car anode et cathode se succèdent à chaque demi-période.

*En conséquence, le courant alternatif n'est pas utilisé pour des électrolyses.*

### 7.2.2 Effet magnétique

L'action d'un champ magnétique sur un courant alternatif est la même qu'en courant continu si ce n'est que la force électromagnétique ou force de Laplace change de sens au même rythme que celui du courant.

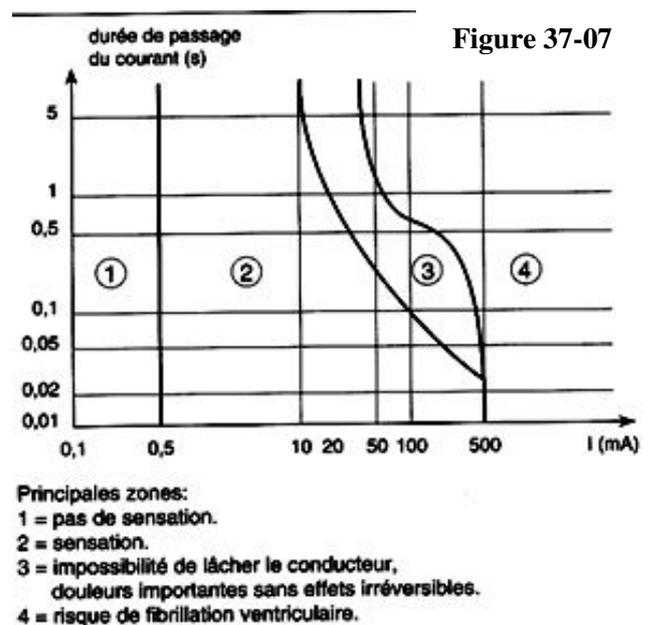
### 7.2.3 Effet biologique

Des courants alternatifs, mêmes faibles traversant le corps humain peuvent provoquer des blessures ou même la mort.

Les blessures sont dues à l'énergie thermique dégagée lors du passage du courant par effet Joule  
Il existe d'autres actions sur le corps humain :

Contraction du diaphragme pour  $I > 25 \text{ mA}$

Fibrillation ventriculaire = dérèglement de l'activité électrique du cœur



Les effets d'un courant alternatif de 50 Hz sur l'être humain sont donnés à la figure 37-07



## 7.2.4 Effet calorifique - Grandeurs efficaces

L'effet Joule ne dépend pas du sens du courant.

Le courant alternatif permet la production de chaleur pour le chauffage et l'éclairage par incandescence si sa fréquence est suffisante ( $f > 30 \text{ Hz}$ ) pour produire un éclat fixe.

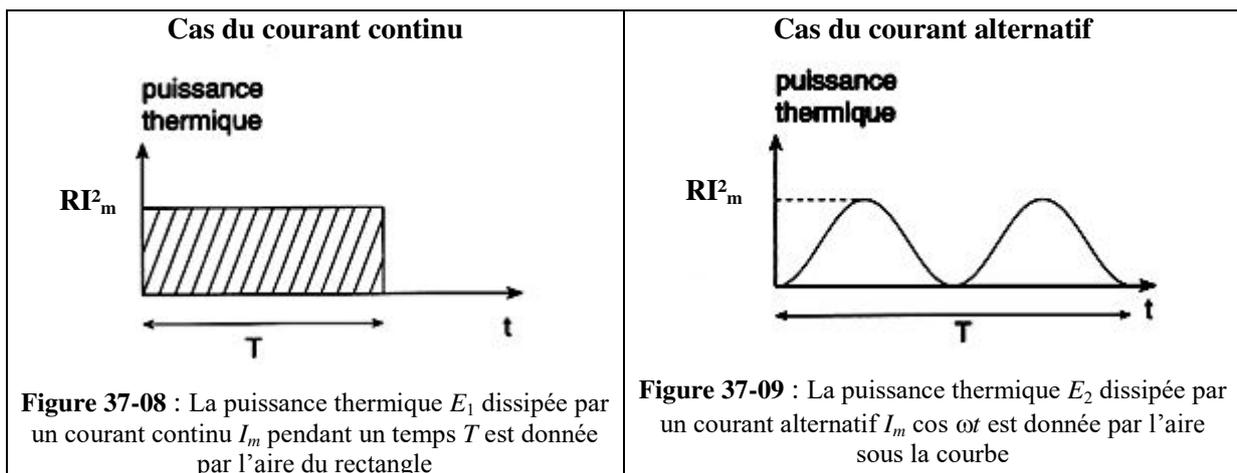
### 7.2.4.1 Intensité efficace $I_{\text{eff}}$ ou $I_e$

La quantité de chaleur dégagée pendant un temps  $t$  dans une résistance  $R$  parcourue par un courant d'intensité  $I$  est :  $E = RI^2t$

Dans le cas d'un courant continu, le courant ( $I_m$ ) est constant :  $E_1 = RI_m^2t$

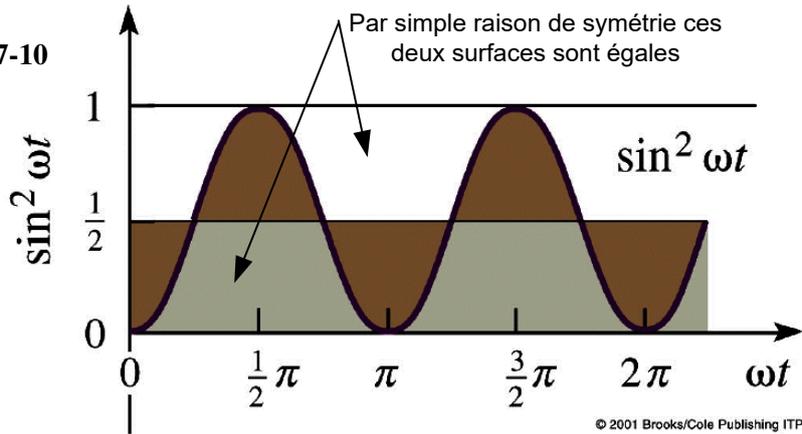
Si l'intensité est sinusoïdale alors on a :  $E_2 = RI_m^2 \sin^2 \omega t$

Les quantités de chaleur dégagées peuvent être visualisées par les aires sur des graphiques donnant la puissance thermique en fonction du temps.



Comme le montre la figure 37-10,  $E_2$  est simplement la moitié de  $E_1$

Figure 37-10



On a donc :  $E_2 = \frac{1}{2} E_1 \rightarrow E_2 = \frac{1}{2} R I_m^2 t$ .

On peut imaginer un courant continu (qu'on appellera  $I_e$ ) qui produirait le même dégagement de chaleur, pendant le même temps que le courant alternatif. Ce courant continu appelé courant efficace d'intensité  $I_e$  serait tel que

$$R.I_e^2.t = \frac{R.I_m^2.t}{2} \Rightarrow I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

*On appelle intensité efficace  $I_e$  d'un courant alternatif, l'intensité d'un courant continu qui dégage, pendant une période et dans la même résistance, la même quantité de chaleur que le courant alternatif.*

### 7.2.4.2 Différence de potentiel efficace $U_{eff}$ ou $U_e$

La différence de potentiel efficace  $U_e$  est la différence de potentiel continue qui, appliquée aux extrémités d'une résistance  $y$  produit un courant d'intensité égale à l'intensité efficace du courant alternatif.

$$U_e = R.I_e = R.\frac{I_m}{\sqrt{2}} \Rightarrow U_e = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

### 7.2.4.3 Remarques

Les appareils de mesure de courant alternatif mesurent toujours les grandeurs efficaces du courant

Ainsi, aux bornes d'une prise de courant, on mesure une ddp de 220V. Cela représente  $U_e$ .

La ddp instantanée aux bornes de la prise oscille donc de  $-311V$  à  $+311V$ .

### 7.2.4.4 Puissance

L'avantage de travailler avec des valeurs efficaces s'illustre la formule suivante :

$$P = U_e . I_e$$

qui donne la puissance moyenne de l'appareil. La

**TABLEAU 23.1** Consommation de puissance électrique

Appareil	Puissance courante (W)
Fourneau	12 000-16 000
Sèche-linge	1 000-8 000
Four	4 000-8 000
Sèche-cheveux	1 000-1 300
Lave-vaisselle	1 200-1 500
Radiateur électrique	1 200
Fer à repasser	1 100
Grille-pain	1 100
Broyeur d'ordure	1 000
Réfrigérateur (grand)	800
Aspirateur	600
Machine à laver	550-800
Mixeur	400
Ventilateur	200
Téléviseur	100
Machine à écrire	90
Humidificateur	40
Pendule	4

**Moteurs** (normes anglo-saxonnes)

1 hp	1 500
1/2 hp	1 000
1/4 hp	700
1/6 hp	450

puissance indiquée sur les appareils est toujours une puissance moyenne ?

### Exemple

Sur la plaque métallique d'un sèche-cheveux, on lit 220 V et 2200 W. Supposant que cet appareil est équivalent à une pure résistance (ce qui n'est pas vrai à cause de la bobine du moteur), quelle est l'intensité du courant débité ? Quelle est la valeur maximale de l'intensité du courant ?

### Solution

$$\text{L'intensité efficace : } I_e = \frac{P}{U_e} = \frac{2200}{220} = 10 \text{ A}$$

$$\text{L'intensité maximale est donnée par : } I_m = \sqrt{2} \cdot I_e = 14.1 \text{ A}$$

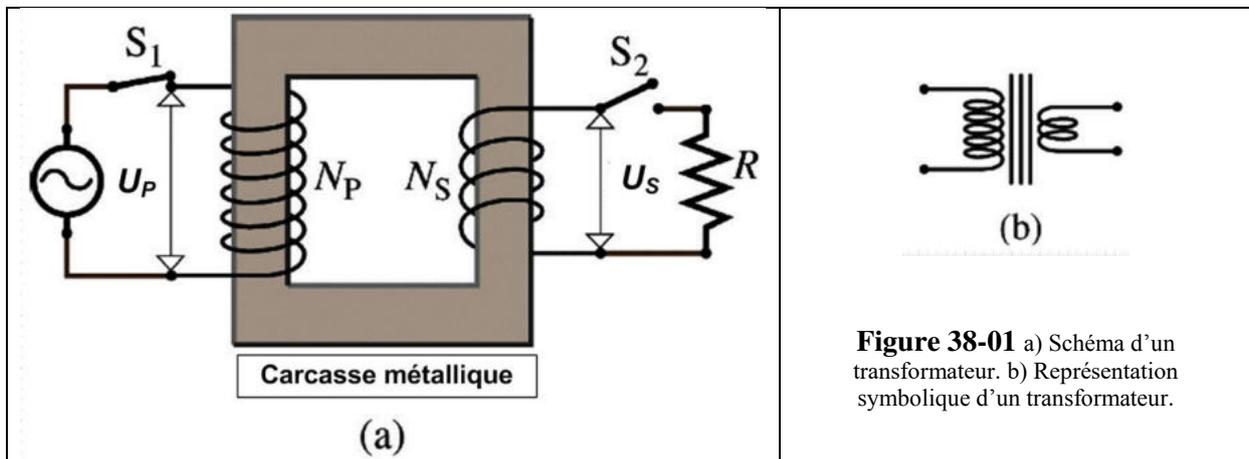
$$\text{Et finalement la loi d'Ohm donne : } R = \frac{U_e}{I_e} = \frac{220}{10} = 22 \Omega$$

## 8. Les transformateurs

### 8.1 Introduction

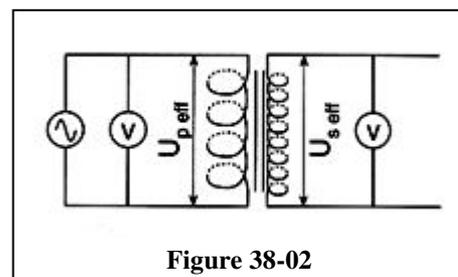
Les utilisateurs de courant électrique n'ont pas tous besoin de la même tension. Ainsi une sonnerie électrique fonctionne sous un d.d.p. de 6V et une lampe halogène sous 12V ou 24V. Il faut donc un système qui permet de modifier la tension ; c'est le **transformateur**. Cet appareil ne fonctionne qu'en courant alternatif et pas en courant continu..

### 8.2 Description



Le transformateur se compose de :

- Un circuit primaire = bobine constituée de  $N_p$  spires
- Un circuit secondaire = bobine constituée de  $N_s$  spires
- Un circuit magnétique constitué de tôles isolées de fer dont le plan est constamment parallèle aux lignes du champ magnétique = carcasse métallique. (voir Figure 36-25 : Courants de Foucault).



## 8.3 Expérience

Le primaire est raccordé à une source de courant alternative de tension  $U_p$  (grandeur efficace)

Le secondaire est relié au circuit utilisateur et à ses bornes existe une tension  $U_s$  (grandeur efficace)

Regardons l'influence de  $N_p$  et de  $N_s$  sur  $U_s$ .

### 8.3.1 Loi du transformateur

Si le courant primaire varie avec le temps, il crée un flux magnétique variable qui traverse également la bobine du secondaire. A cause de sa perméabilité, le noyau de fer multiplie le flux engendré par le courant primaire par un facteur  $10^4$ . Il constitue un chemin facile pour le champ magnétique, qui est alors presque totalement confiné dans le fer et réalise un couplage effectif des deux bobines.

L'inductance  $L$  considérable à cause du noyau de fer produit une tension électromotrice d'auto-induction très importante. ( $E = -L \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ ). Cette tension électromotrice s'oppose à la tension appliquée

$U_p$  et maintient le courant primaire  $I_p$  très faible.

Le même flux variable avec le temps traverse toutes les spires et produit donc dans chaque spire la même tension électromotrice induite. De sorte que la TEM du primaire ( $TEM_p$ ) est proportionnelle à  $N_p$  et que la TEM du secondaire ( $TEM_s$ ) est proportionnelle à  $N_s$ . Si les résistances des bobines sont négligeables, on peut de plus considérer :  $TEM_p = U_p$  et  $TEM_s = U_s$ .

Finalement, pour un transformateur idéal c'est à dire sans perte magnétique, on a

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{U_s}{U_p}$$

Le rapport  $N_s/N_p$  est appelé « **rapport de transformation** »

- $N_s/N_p > 1$      *le transformateur élève la tension*
- $N_s/N_p < 1$      *le transformateur abaisse la tension*

Comme la puissance ( $P = U.I$ ) est conservée lors du passage de l'énergie électrique du primaire vers le secondaire, on a ;

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{U_s}{U_p} = \frac{I_p}{I_s}$$

#### Exemple

L'adaptateur d'une calculatrice de poche contient un transformateur qui est alimenté par une tension de 220 V et qui l'abaisse à une tension de 11 V. Le reste du circuit de l'adaptateur redresse le courant pour fournir un courant continu à la calculatrice.

1. Sachant que le secondaire de ce transformateur est formé de 50 spires, que doit être le nombre de spires du primaire ?
2. Quel est alors le rapport de transformation.
3. Si le transformateur débite un courant d'intensité efficace de 450 mA, quelle est l'intensité du courant au primaire ?

#### Solution

1) Nombre de spires du primaire :  $N_p = \frac{N_s U_p}{U_s} = \frac{50 \times 220}{11} = 1000$  spires

2) Rapport de transformation :  $\frac{N_p}{N_s} = \frac{1000}{50} = 20$

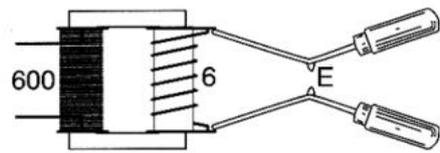
$$3) \text{ Intensité au primaire : } I_p = \frac{U_s I_s}{U_p} = \frac{11 \times 0,450}{220} = 22,5 \text{ mA}$$

## 8.4 Applications

### 8.4.1 Soudure par point

Utilisons un transformateur comprenant 600 spires au primaire et 6 spires au secondaire. Fermons le circuit secondaire à l'aide d'un petit clou. Soumettons le primaire à une différence de potentiel de 220 V. Si la résistance du secondaire est faible, nous pouvons obtenir jusque 500 A malgré la petitesse de  $U_{s \text{ eff}}$  (2.2 V). Le clou va alors devenir incandescent et fondre. La soudure électrique par point repose sur ce principe. On serre deux tôles entre les électrodes  $E$  d'une pince à souder. Si le courant dans le secondaire est suffisant, les deux tôles vont se souder au point de contact.

Figure 38-03



### 8.4.2 Production de basse tension

Pour les ampoules halogènes, sonneries électriques,...

### 8.4.3 Transport de l'énergie

Pourquoi faut-il transformer la tension du courant pour la transporter ?

$$\text{L'intensité de transport du courant est : } I = \frac{P}{U}$$

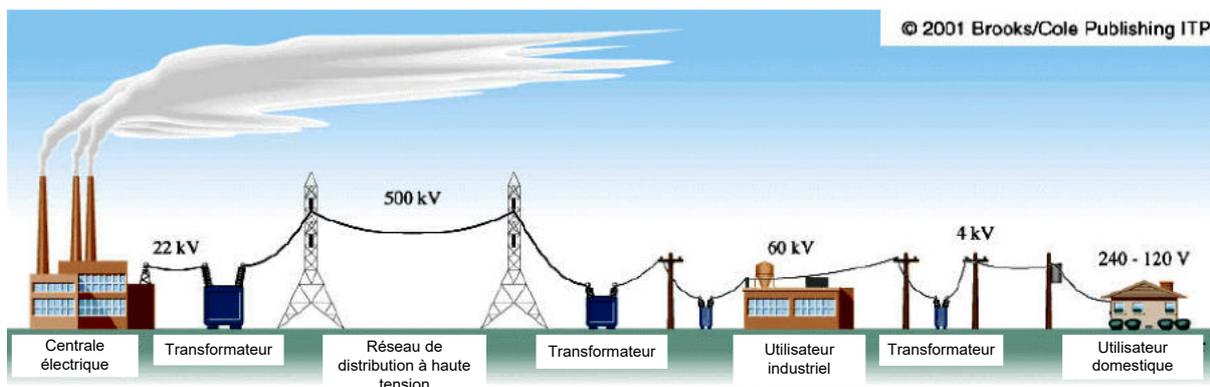
Tout conducteur parcouru par un courant est soumis à l'effet Joule :  $E = RI^2t$

La puissance perdue par effet Joule est donc :  $P = RI^2$

Pour limiter ces pertes, la compagnie d'électricité a plusieurs choix:

1. diminuer la résistance  $R$  des câbles
  - choisir un bon conducteur (cuivre)
  - augmenter la section des câbles (max 5 cm<sup>2</sup>)
2. diminuer l'intensité du courant dans les câbles
  - Comme  $P$  est constant et  $P = UI$  si  $I$  diminue,  $U$  doit augmenter

*Pour limiter les pertes par effet Joule dans les lignes de transport, l'énergie électrique doit être transportée sous haute tension. (Fig. : 38-04)*



**Figure 38-04 :** Transmission de la puissance électrique par courant alternatif. Des transformateurs élèvent la tension, ce qui permet de transporter efficacement l'énergie sur de longues distances sous haute tension. Puis on abaisse la tension pour usage industriel et domestique.

### Exemple

Prenons un exemple pratique. Supposons que nous souhaitons transporter une puissance de 20 GW sur une distance 50 km.

#### 1<sup>ère</sup> possibilité : Utiliser une tension de 90 kV.

Le cuivre est peu ou pas utilisé pour les lignes à haute tension malgré sa très bonne résistivité de  $1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$  à cause de son prix et de son poids. On lui préfère des alliages du type aluminium-magnésium-silicium moins cher et plus léger. Cela donne pour une résistance de l'ordre de  $6 \times 10^{-2} \Omega/km$ . Pour des raisons techniques qui sortent du cadre de ce cours, les fils ont une section de maximum  $500 \text{ mm}^2$ , soit 25 mm de diamètre et la densité de courant est limitée à 0.7–0.8 A/mm<sup>2</sup>.

Pour transporter les 20 GW, il faut un courant de  $I = \frac{P}{U} = \frac{20 \times 10^6}{90 \times 10^3} = 222 \text{ A}$ . La résistance de la ligne

est de  $R = 2 \times 50 \times 6 \times 10^{-2} = 6 \Omega$  (2×50 km car il y a un aller et un retour).

La puissance perdue est donc de  $P = RI^2 = 6 \times 222^2 = 296 \text{ kW}$  soit 1.5% de la puissance transportée.

La section des fils sera d'environ :  $S = \frac{222}{0.7} = 317 \text{ mm}^2$  soit un diamètre de 20 mm Ce qui représente une masse d'environ 10 tons.

#### 2<sup>ème</sup> possibilité : Utiliser une tension de 12 000 V

Cette tension demande un courant 1667 A, et une perte de puissance de 16 667 kW soit 83% de l'énergie transportée.

Si ce chiffre ne suffit pas à convaincre, on notera que le diamètre des fils passe à 55 mm, donc une masse d'environ 71 tons.



**Figure 38-05**  
Lignes à haute tension

## 9. Les circuits en courant alternatif

Dans ce chapitre, on se propose d'étudier expérimentalement le comportement du courant alternatif dans des circuits simples tels qu'un résistor, une bobine et un condensateur.

Rappelons qu'en courant alternatif, le voltmètre mesure la tension efficace  $U_e$  et l'ampèremètre, l'intensité efficace  $I_e$ .

## 9.1 Circuit contenant un résistor R

Soit un résistor de résistance électrique  $R$ , appliquons lui une tension  $U_e$  à ses bornes

### 9.1.1 Schéma

Si on applique une tension alternative de grandeur efficace  $U_e$  à un résistor de valeur  $R$ , il y circule un courant d'intensité efficace  $I_e$  qui est telle qu'à chaque instant (figure 39-01) :

$$I_e = \frac{U_e}{R}$$

*Ce résultat est indépendant de la fréquence de la tension alternative*

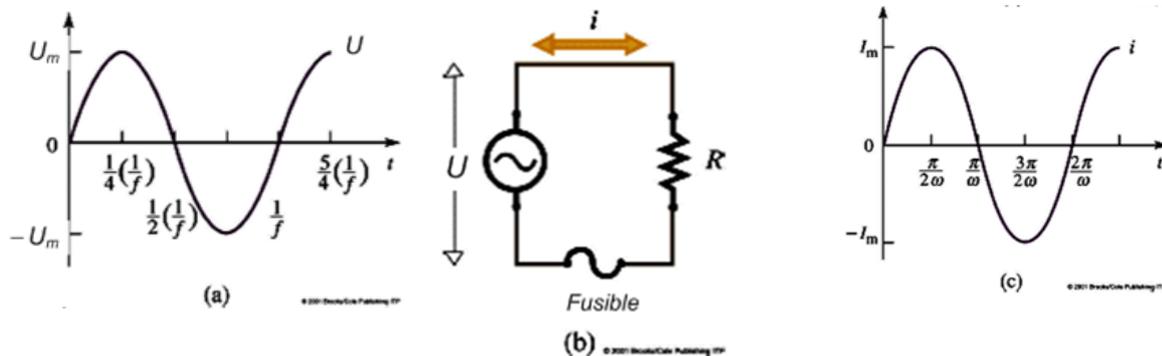
*C'est la loi d'Ohm avec les grandeurs efficaces et ce quel que soit la valeur de la fréquence du courant )*

### 9.1.2 Conclusions

1. *Indépendamment de la fréquence,  $U_e$  et  $I_e$  sont proportionnelles*
2. *Quelle que soit la fréquence  $f$ , nous avons*

$$I_e = \frac{U_e}{R}$$

$I_e$  Intensité efficace, en A  
 $U_e$  Tension efficace, en V  
 $R$  Résistance, en  $\Omega$

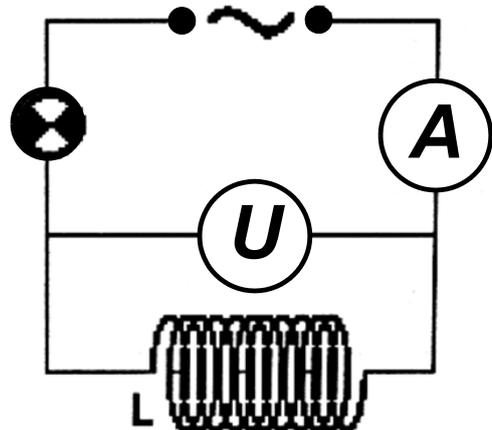


**Figure 39-2 :** (a) Une tension sinusoïdale ; (b) On applique cette tension entre les bornes d'une résistance. (c) Le courant produit est sinusoïdal, de même fréquence et en phase avec la tension.

## 9.2 Circuit contenant une bobine ou un solénoïde d'inductance L

Réalisons le montage de la figure 39-02 en utilisant une bobine sans noyau ferromagnétique de 500 spires et alimentée en tension alternative de fréquence  $f = 100 \text{ Hz}$  et de valeur efficace  $U_e = 5 \text{ V}$ . Observons l'éclat de l'ampoule et mesurons l'intensité efficace.

Augmentons l'inductance ( $L$ ) de la bobine en y plaçant un noyau ferromagnétique. Observons l'éclat de l'ampoule et mesurons l'intensité efficace.



**Lorsque l'inductance augmente, l'éclat de l'ampoule diminue ainsi que l'intensité du courant électrique.**

Retirons l'ampoule du circuit et plaçons notre bobine de 500 spires dans un noyau ferromagnétique totalement fermé Pour une fréquence de 1000 Hz, relevons les intensités efficaces pour des différences de potentiel efficaces valant successivement 2 V, 3 V, 4 V et 5 V.

**Nous constatons que  $U_e$  et  $I_e$  sont proportionnels.**

Pour une tension efficace de 4 V et en utilisant la bobine munie du noyau ferromagnétique fermé, observons les valeurs de l'intensité efficace pour des fréquences augmentant progressivement de 500 Hz à 2000 Hz.

**Lorsque la fréquence augmente**

- **L'intensité efficace du courant électrique diminue.**
- **La valeur du quotient  $U_e / I_e$  augmente.**

## 9.2.1 Conclusions

**Pour une fréquence  $f$  précise, le rapport  $U_e / I_e$  est une constante pour une bobine Cette constante augmente**

- **si l'inductance  $L$  de la bobine augmente**
- **si la fréquence  $f$  du courant augmente**

## 9.2.2 Impédance d'un élément de circuit électrique

Quel que soit l'élément utilisé (résistor, bobine, condensateur) nous arrivons à la conclusion suivante, pour une fréquence donnée,  $U_e / I_e$  est une constante

**Cette constante contrairement à ce qui se passe en courant continu, dépend de certains facteurs tels que les éléments du circuit, la fréquence  $f$  du courant, ....**

**Pour cette raison, le rapport  $U_e / I_e$  est appelé impédance du circuit et elle se note  $Z$**

**Cette impédance étant le rapport d'une tension en volt sur une intensité en ampère se mesure en Ohm ( $\Omega$ )**

**En courant alternatif, l'impédance d'un circuit est de 1  $\Omega$  si lorsqu'il est soumis à une d.d.p. efficace de 1 V, il est parcouru par un courant d'une intensité de 1 A.**

Cette impédance doit tenir compte des faits expérimentaux c'est à dire qu'elle doit être fonction des caractéristique du circuit ainsi que de la fréquence du courant utilisé.

**Pour un résistor dont la résistance est  $R$**

$$Z_R = R \quad \text{Indépendant de } f$$

**Pour une bobine, l'impédance  $Z_L$  est d'autant plus grande**

- **que la résistance  $R$  du fil qui le constitue est plus élevée**
- **que son inductance  $L$  est grande**
- **que la fréquence  $f$  du courant est grande**

On montre que

$$Z_L = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{R^2 + (2\pi f \cdot L)^2}$$

### L'effet de self

L'analyse de l'impédance  $Z_L$  d'une bobine montre qu'une bobine s'oppose donc au passage du courant et de par sa résistance propre  $R$  due au fil mais aussi par son inductance  $L$ .

Elle s'oppose de plus en plus au courant de hautes fréquences (HF). On dit qu'une bobine étouffe les courants HF.

Si  $f = 0$  Hz (courant continu) alors l'impédance  $Z$  devient égale à  $R$  et la bobine n'est plus qu'une simple résistance sans effet de self (comme celle rencontrée en courant continu).

### Loi d'ohm pour un circuit RL

$$I_e = \frac{U_e}{Z_L}$$

$I_e$  Intensité efficace, en A  
 $U_e$  Tension efficace, en V  
 $Z_L$  Impédance du circuit RL, en  $\Omega$

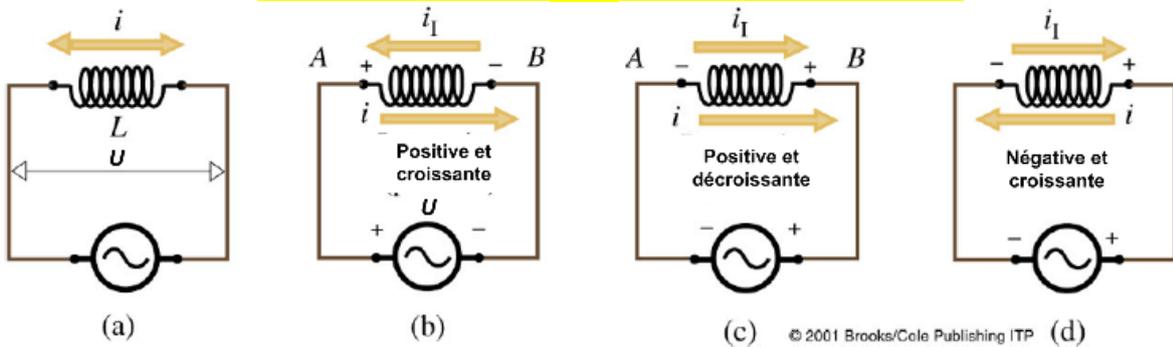


Figure 39-03 : (a) Un conducteur branché à un générateur alternatif. (b) Quand  $i$  est positive (dans le sens des aiguilles d'une montre) et croissante, la tension  $U$  entre ses bornes est positive. (c) Quand  $i$  est positive et décroissante,  $U$  est négative et (d) quand  $i$  est négative et croissante,  $U$  est négative.

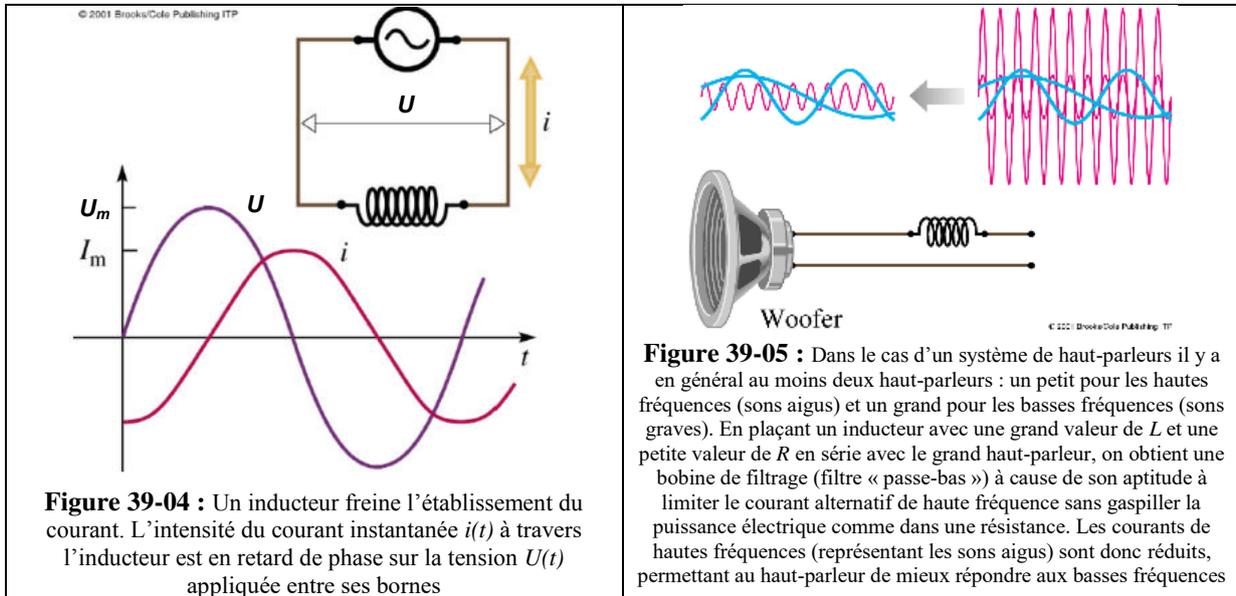


Figure 39-04 : Un inducteur freine l'établissement du courant. L'intensité du courant instantané  $i(t)$  à travers l'inducteur est en retard de phase sur la tension  $U(t)$  appliquée entre ses bornes

Figure 39-05 : Dans le cas d'un système de haut-parleurs il y a en général au moins deux haut-parleurs : un petit pour les hautes fréquences (sons aigus) et un grand pour les basses fréquences (sons graves). En plaçant un inducteur avec une grande valeur de  $L$  et une petite valeur de  $R$  en série avec le grand haut-parleur, on obtient une bobine de filtrage (filtre « passe-bas ») à cause de son aptitude à limiter le courant alternatif de haute fréquence sans gaspiller la puissance électrique comme dans une résistance. Les courants de hautes fréquences (représentant les sons aigus) sont donc réduits, permettant au haut-parleur de mieux répondre aux basses fréquences

### Exemple

Un circuit de radio contient un inducteur de  $400\text{ mH}$  et une résistance de  $0.50\ \Omega$ . Il est branché à une tension alternative efficace de  $80\text{ V}$  et de  $100\text{ Hz}$ . Déterminer l'impédance de la bobine et le courant efficace débité.

**Solution**

L'impédance de la bobine est  $Z_L = \omega L = 2\pi fL = 2 \times \pi \times 100 \times 0.4 = 251 \Omega$

Par comparaison la résistance est négligeable, nous pouvons traiter la bobine comme une inductance pure.

$$\text{Alors : } I_e = \frac{U_e}{Z_L} = \frac{80}{251} = 0.32 \text{ A}$$

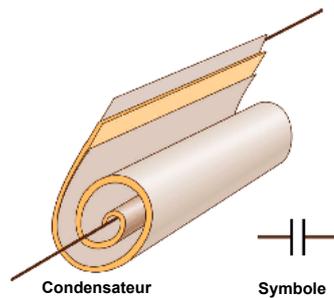
## 9.3 Tension alternative appliquée à un condensateur

### 9.3.1 Les condensateurs

*Un condensateur est constitué de 2 plaques conductrices séparées par un isolant aussi appelé diélectrique.*

Quand les 2 feuilles conductrices et l'isolant sont enroulés on obtient un condensateur de forme cylindrique. (Fig. 39-06)

Normalement, sur chacune des plaques, il y a autant de charges électriques positives et négatives.



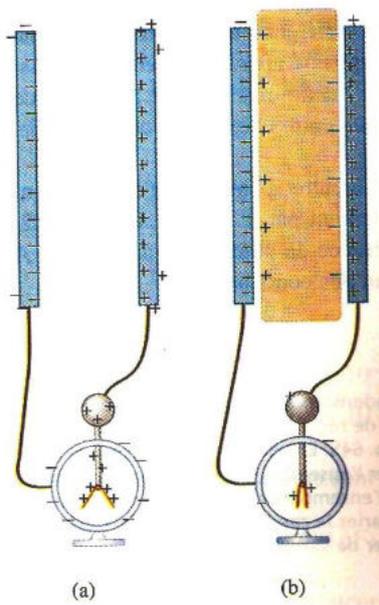
**Figure 39-06 :** Quand la feuille de diélectrique sépare deux feuilles et le tout est enroulé et scellé, on obtient un condensateur parallèle enroulé.



**Figure 39-07 :** Exemple de petits condensateurs utilisés dans les appareils électroniques de faible puissance.



**Figure 39-08 :** Exemple de condensateur utilisé dans les anciens postes radios



**Figure 39-09 :** (a) un condensateur chargé relié à un condensateur, qui indique alors la différence de potentiel. (b) En insérant un diélectrique, on neutralise une partie de la charge sur les plaques et on baisse la différence de potentiel. Une charge plus grande peut être emmagasinée sous une différence de potentiel donnée.

d'avoir une plus grande quantité de charges pour une différence de potentiel donnée (Fig. 39-09).

Ainsi, la d.d.p. entre les plaques du condensateur augmente jusqu'à être égale à la d.d.p. du générateur.

En effet, la répulsion des électrons déjà accumulés sur la plaque négative empêche toute arrivée d'une nouvelle particule chargée.

Alors tout mouvement d'électrons cesse : le condensateur est chargé.

Lorsque le condensateur est branché aux bornes d'un générateur, il y a accumulation de charges négatives sur une plaque et accumulation de charges positives sur l'autre plaque. La présence de l'isolant empêche la neutralisation des charges et permet

*Un condensateur est donc un dispositif capable d'accumuler des charges. La charge prise par une armature est notée  $Q$*

*On définit la capacité  $C$  d'un condensateur qui prend une charge  $Q$  quand il est soumis à une tension  $U$  par :*

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

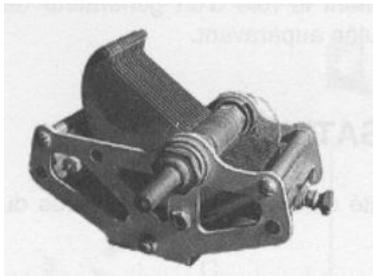
$C$  Capacité, en  $F$   
 $Q$  Charge électrique, en  $C$   
 $U$  Différence de potentiel, en  $V$

*Le farad est la capacité d'un condensateur portant une charge de 1 coulomb lorsqu'il est soumis à une différence de potentiel de 1 V.*

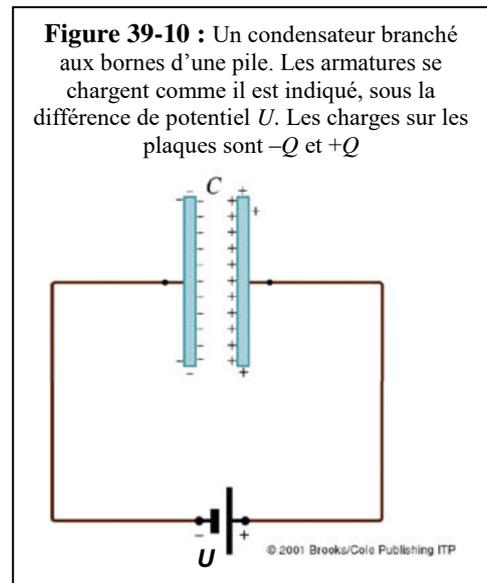
On utilise surtout le  $\mu F$  ( $10^{-6}F$ ),  $nF$  ( $10^{-9}F$ ),  $pF$  ( $10^{-12}F$ )

Tous les condensateurs n'ont pas la même capacité car celle-ci dépend :

- De la surface des plaques
- De la distance entre les plaques
- De la nature de l'isolant entre les plaques



**Figure 39-11 :** La capacité de ce condensateur peut varier dans de larges proportions en déplaçant les plaques mobiles par rapport aux plaques fixes.



**Figure 39-10 :** Un condensateur branché aux bornes d'une pile. Les armatures se chargent comme il est indiqué, sous la différence de potentiel  $U$ . Les charges sur les plaques sont  $-Q$  et  $+Q$

Lorsqu'un condensateur est chargé, il est possible de libérer ces charges accumulées tout simplement en reliant ces 2 plaques entre elles via un circuit résistif. Un courant circule alors dans le circuit extérieur et le condensateur se décharge.

*Dans ce cas le condensateur est temporairement un générateur de courant libérant ainsi toute l'énergie accumulée lors de la charge.*

### Lecture : Le flash électronique

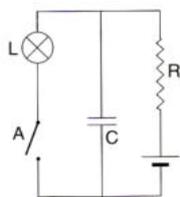


Figure 5.9

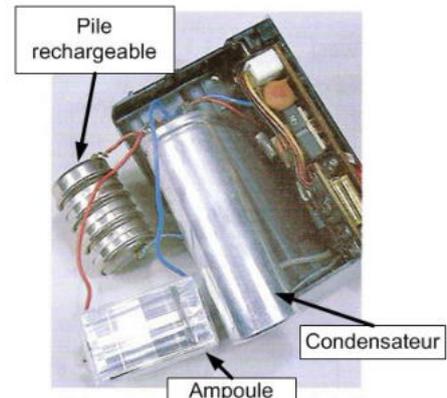
Les condensateurs sont largement utilisés dans les circuits électriques : circuits électriques des radios, télévisions, circuits de démarrage des moteurs électriques, systèmes d'allumage des voitures, flash des appareils photographiques, temporisateurs, alarmes, ...

À titre d'exemple, expliquons comment fonctionne le flash des appareils photographiques, dont le schéma de principe est illustré à la figure 5.9. Le circuit comprend une pile, un condensateur  $C$ , une résistance  $R$ , une lampe  $L$  de résistance  $r$  et un interrupteur  $A$  (qui est celui que l'on actionne quand on fait la prise de vue).

Ici, tout repose sur le fait que la résistance  $r$  de la lampe est très faible par rapport à la résistance  $R$  placée dans le circuit. En effet :

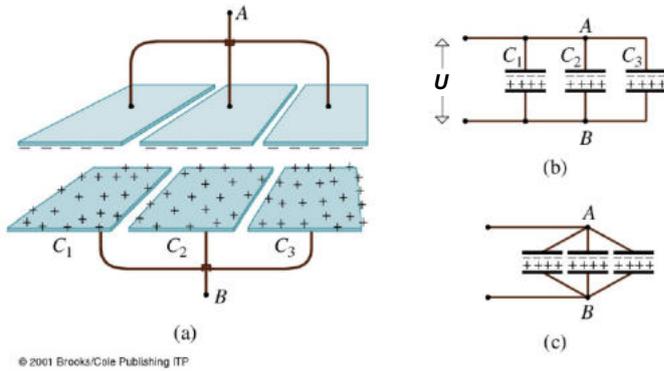
- lorsque l'interrupteur  $A$  est ouvert, le condensateur se charge, ce qui prend quelques secondes à cause de la grande résistance  $R$
- par contre, lorsque l'interrupteur  $A$  est fermé, à cause de la petite résistance  $r$  de la lampe, le condensateur va brutalement se décharger à travers la lampe. Il se produit dès lors dans la lampe un courant de grande intensité, ce qui va produire un flash lumineux intense.

Ajoutons que, dans ce circuit, un interrupteur classique ne peut convenir : il serait inévitablement abîmé par un courant aussi important. C'est la raison pour laquelle, on utilise plutôt un interrupteur électronique (un transistor par exemple).



**Figure 39-12 :** Flash électronique

### 9.3.1.1 Condensateurs en parallèle

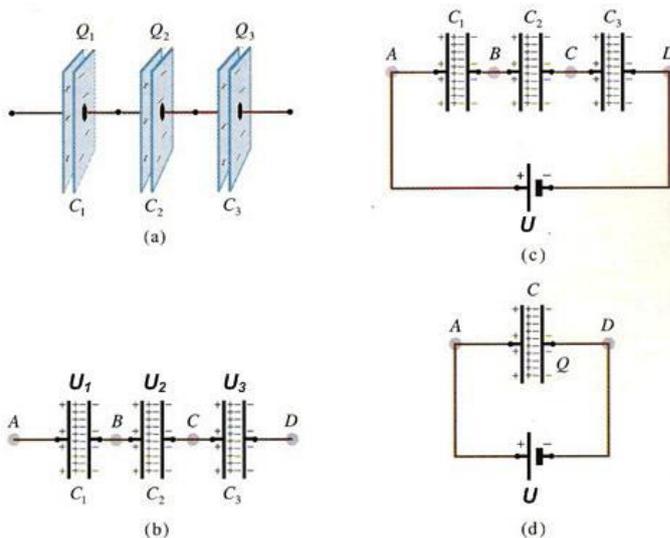


Des condensateurs placés en parallèle sont équivalents à un condensateur dont la capacité est égale à la somme des capacités individuelles.

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

**Figure 39-13 :** (a) Trois condensateurs en parallèle représentés de plusieurs manières équivalentes. (b) La capacité résultante est la somme des capacités. Les trois circuits (a), (b) et (c) sont électriquement les mêmes.

### 9.3.1.2 Condensateurs en série.



Des condensateurs placés en série sont équivalents à un condensateur dont l'inverse de la capacité est égal à la somme des inverses des capacités individuelles.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

**Figure 39-14 :** (a) Trois condensateurs associés en série et (b) circuit représentatif. (c) Les mêmes condensateurs en série branchés à une pile. (d) Le circuit équivalent avec  $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$

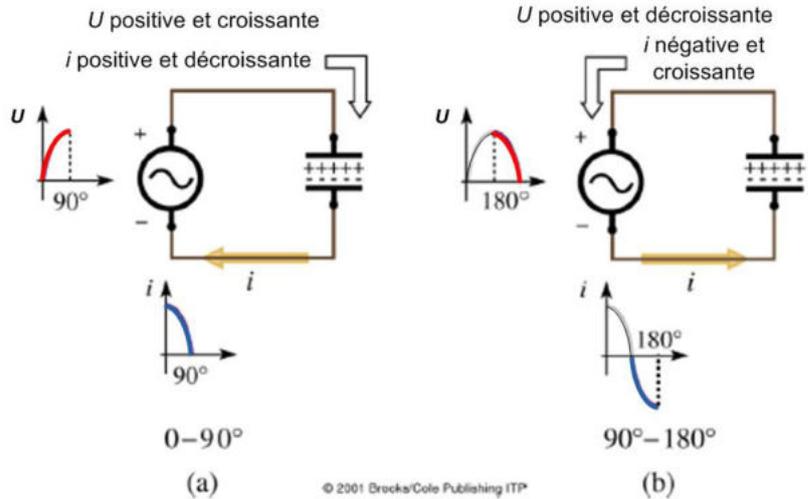
## 9.3.2 Condensateur en courant alternatif

Dans le cas d'un condensateur relié à une pile, nous avons vu que les armatures vont se charger, jusqu'à ce que la répulsion empêche l'arrivée de nouvelles charges. Il apparaît un potentiel  $U = \frac{Q}{C}$  qui augmente et finit par s'équilibrer avec la tension de la pile et alors le courant s'arrête. Comme  $C$  est constante :  $\Delta U = \frac{\Delta Q}{C}$ . Ce qui signifie qu'une variation de charge est associée à une variation de tension. Or  $i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ , donc  $i = \frac{1}{C} \frac{\Delta U}{\Delta t}$ . Ainsi, s'il n'y a pas de variation de tension, il n'y a pas de courant. (On dit que le courant continu ne « traverse » pas un condensateur).

### 9.3.2.1 Description

Maintenant, branchons le condensateur aux bornes d'un générateur de tensions alternatives. Nous voulons comparer la tension  $U$  entre les bornes du condensateur et l'intensité  $i$  du courant dans le circuit.

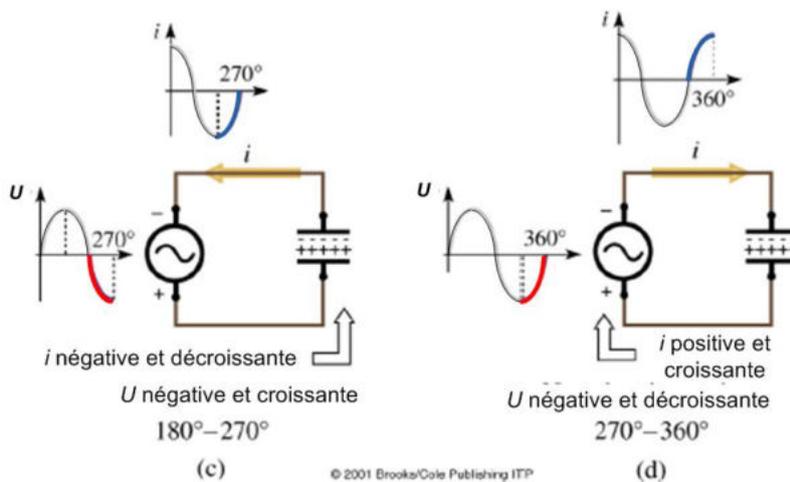
**Figure 39-14 (a) :** A partir de l'instant  $t = 0$  et pendant le premier quart de période, la phase augmente de  $0^\circ$  à  $90^\circ$ ,  $U$  est positive et augmente de 0 à son maximum  $U_m$ . Les armatures du condensateur vont se charger. Un courant intense va s'établir, car au début aucune charge ne s'oppose à l'arrivée de nouvelles. Au fur et à mesure que la tension augmente, les armatures sont de plus en plus chargées et le courant diminue. Quand la tension atteint son maximum,  $\frac{\Delta U}{\Delta t} = 0$  et le courant s'annule.



**Figure 39-14 (b) :** Pendant le second quart de période, la phase varie de  $90^\circ$  à  $180^\circ$ , la tension diminue jusqu'à zéro.

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} < 0 \rightarrow i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} < 0.$$

Ce qui veut dire que le condensateur se décharge, et le courant circule dans l'autre sens et augmente en valeur absolue.



**Figure 39-14 (c) :** Pendant la troisième période (phase de  $180^\circ$  à  $270^\circ$ ), la tension devient négative et les armatures acquièrent des charges de signes opposés. Ce qui tend à réduire le courant qui s'annule quand la tension atteint sa valeur minimale  $-U_m$ .

**Figure 39-14 (d) :** La phase varie de  $270^\circ$  à  $360^\circ$ . La tension diminue en valeur absolue et le courant redevient positif.

Autrement dit, **le courant**

**instantané dans le condensateur est en avance de phase d'un quart de période ( $90^\circ$ ) sur la tension instantanée.**

Analytiquement, cela donne :  $U = U_m \sin \omega t$ . Or le courant instantané est simplement la dérivée de  $Q$  :

$$i = Q' = (CU)' = (CU_m \sin \omega t)' = C.U_m.\omega \cos \omega t = C\omega.U_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

Ce qui confirme le résultat précédent. De plus :

$$I_m = C\omega U_m \text{ et } I_e = C\omega U_e \rightarrow U_e = \frac{1}{C\omega} I_e$$

Nous définissons alors l'impédance du condensateur :  $Z_C = \frac{1}{\omega C}$

### 9.3.2.2 Conclusions

Pour une tension donnée, l'intensité du courant dans le circuit augmente si :

- la fréquence  $f$  du courant augmente
- la capacité  $C$  du condensateur augmente

Sur du courant alternatif, l'effet du condensateur est l'inverse de celui d'une bobine.

L'intensité du courant est nulle si le courant dans le circuit est du courant continu ( $f = 0$  Hz)

Le rapport  $U_e / I_e$  diminue donc avec  $f$  et avec  $C$

De ce fait, tout comme pour la bobine, on définit l'impédance  $Z_c$  d'un condensateur comme étant le rapport  $U_e / I_e = Z_c$

$$Z_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C}$$

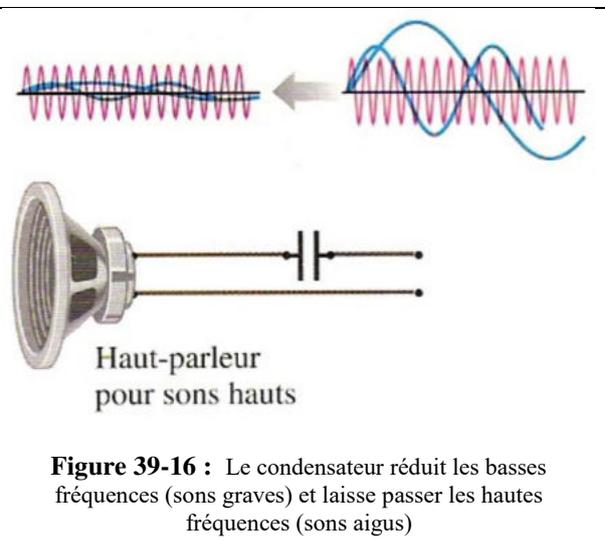
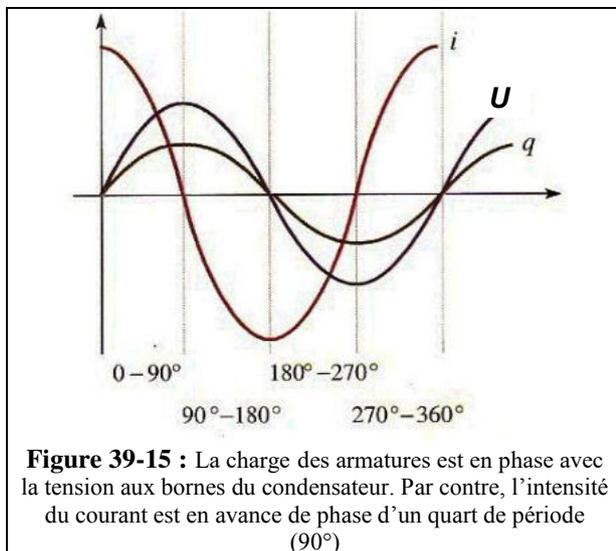
### L'effet de capacité

L'examen de la formule de  $Z_c$  montre que :

Le passage du courant alternatif dans un condensateur est d'autant plus important que  $C$  et  $f$  sont importants : c'est l'effet de capacité (totalement inverse à celui de la bobine)

Si  $f = 0$  Hz (courant continu) alors  $Z_c = \infty$  et  $I_e = 0$ , le condensateur se comporte comme un interrupteur ouvert (pas de courant).

Les condensateurs laissent passer les courants hautes fréquences alors qu'ils arrêtent les courants basses fréquences. Pour les bobines, c'est l'inverse



### Exemple

On branche un condensateur de  $50 \mu\text{F}$  à une source de tension sinusoïdale de 50 Hz avec une tension maximale de 100 V. Quelle est l'intensité du courant efficace dans ce circuit ? Comment cette intensité change-t-elle si on élève la fréquence à 5 kHz ?

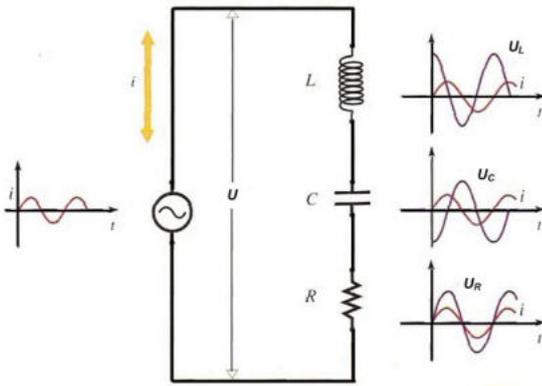
### Solution

Commençons par calculer  $Z_c$  :  $Z_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 50 \times 10^{-6}} = 63.7 \Omega$

Nous avons alors :  $U_e = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{100}{\sqrt{2}} = 70.7 \text{ V} \rightarrow I_e = \frac{U_e}{Z_c} = \frac{70.7}{63.7} = 1.1 \text{ A}$

Si  $f$  passe à  $5 \text{ kHz}$ , l'impédance du condensateur baisse d'un facteur 100 et l'intensité est multipliée par un facteur 100

## 9.4 Circuit RLC



A titre d'exemple, considérons une résistance, un inducteur et un condensateur en série.

Le même courant passe dans chacun des éléments en série dans le circuit. Les tensions entre les bornes de ces éléments ne sont généralement pas en phase et les tensions instantanées s'ajoutent.  $U = U_L + U_C + U_R$

On montre que le circuit à une impédance équivalente à :

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2} \quad \text{et} \quad U_e = Z.I_e$$

### Exemple

Un circuit contient une résistance de  $240 \Omega$ , un condensateur de  $3.80 \mu\text{F}$  et un inducteur de  $530 \text{ mH}$  en série. Il est branché aux bornes d'un oscillateur de  $100 \text{ Hz}$ . Un ampèremètre de résistance négligeable placé dans le circuit indique une intensité efficace de  $250 \text{ mA}$ . Quelle est la tension maximale de l'oscillateur.

### Solution

Calculons l'impédance du circuit :

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{240^2 + \left(2\pi \times 100 \times 0.55 - \frac{1}{2\pi \times 100 \times 3.8 \times 10^{-6}}\right)^2} = 251 \Omega$$

L'intensité maximale est  $I_m = \sqrt{2}.I_e = \sqrt{2} \times 0.250 = 0.353 \text{ A}$

Par conséquent :  $U_m = Z.I_m = 251 \times 0.3535 = 88.7 \text{ V}$

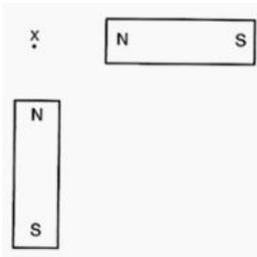
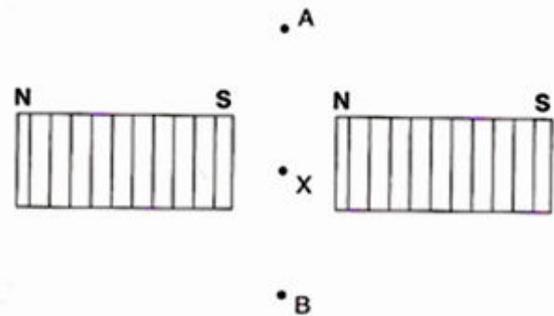
## 10 Exercices

### 10.1 Magnétisme et électromagnétisme

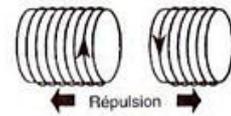
1) Un solénoïde de 50 cm de longueur comporte 1000 spires de 5 cm de diamètre. Ce solénoïde est parcouru par un courant continu d'intensité  $I = 400 \text{ mA}$ .

- Calculer la valeur du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde.
  - Schématiser le solénoïde en indiquant le sens du courant et en représentant le champ magnétique en un point  $P$  à l'intérieur du solénoïde
  - Tracer approximativement les lignes de champ à l'intérieur et à l'extérieur du solénoïde.
- (Rép (a)  $B_{int} = 1.10^{-3} \text{ T}$ )

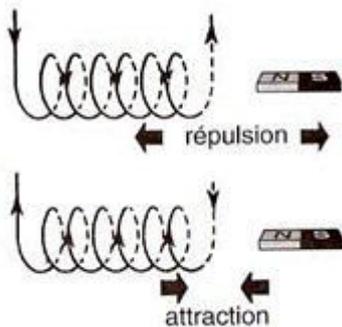
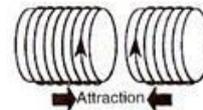
2) Voici deux bobines droites parfaitement identiques et parcourues par des courants identiques. Représenter le vecteur magnétique aux points A, X et B.



3) Voici deux aimants droits identiques. Représenter le vecteur champ magnétique au point X.



4) Expliquer pourquoi ces solénoïdes s'attirent ou se repoussent.

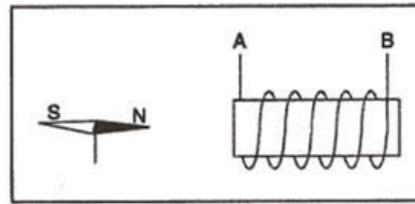
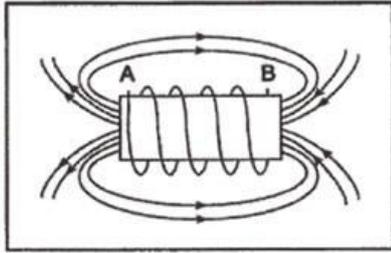


5) Expliquer pourquoi il y a attraction ou répulsion entre le solénoïde et l'aimant.

4) Un solénoïde a une longueur de 50 cm et comporte 1500 spires. Quelle est l'intensité que doit avoir le courant qui le traverse pour que le champ magnétique soit de 0.06 T ?

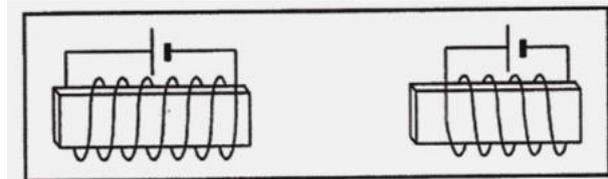
5) Un même courant électrique circule dans deux bobines dont l'une a une longueur de 5 cm et comporte 100 spires. L'autre bobine a une longueur de 7 cm et comporte 140 spires. Quel est le rapport entre l'intensité des champs magnétiques créés à l'intérieur de ces bobines ?

6) Dans quel sens passe le courant dans les bobines représentées ci-dessous ?

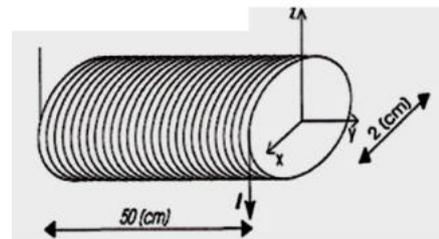


7) Calculer l'intensité du champ magnétique à l'intérieur d'une bobine qui contient 3000 spires et de 3 cm de longueur. L'intensité du courant électrique traversant ce solénoïde est de 2 mA. Schématiser ce solénoïde en indiquant le sens du courant, le champ magnétique en un point P à l'intérieur du solénoïde et tracer les lignes de champ.

8) Décrivez la force qui se manifeste sur chaque électroaimant représenté ci-contre.



9) Un solénoïde de 50 cm de long et de 2 cm de diamètre est composé de 4000 spires. Dessiner le champ magnétique produit par la bobine et déterminer son intensité lorsqu'un courant de 0.25 A la parcourt.



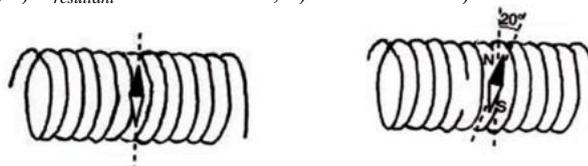
10) Une petite boucle conductrice de 3 cm de rayon est fixée verticalement sur un support permettant de placer en son centre une petite boussole. Celle s'oriente donc initialement sous l'influence du magnétisme terrestre. En tournant la spire, on fait en sorte que l'aiguille de la boussole soit complètement alignée dans le plan de la spire. La grandeur du champ magnétique terrestre sur l'aiguille est de  $2 \times 10^{-5} T$ .

- Un courant d'intensité de 4 A est lancé dans la boucle, quelle est l'intensité du champ magnétique produit par la boucle sur cette boussole ? ( $8.4 \times 10^{-5} T$ )
- Quel angle de déviation par rapport à sa direction initiale sera pris par la boussole sous la double influence de la Terre et de la boucle ? (Faites un schéma de la situation) ( $77^\circ$ )

11) Plaçons un morceau de fer de perméabilité relative égale à 500 dans un solénoïde. Le champ magnétique à l'intérieur de ce solénoïde vaut 0.2 T. Le solénoïde possède 5 spires par cm de longueur. Calculer l'intensité du courant électrique qui circule dans le solénoïde. ( R :  $I = 637 mA$  )

12) On place une aiguille aimantée à l'intérieur d'un solénoïde dans lequel aucun courant ne circule. Cette aiguille va dès lors s'orienter suivant la direction du champ magnétique terrestre. On tourne alors le solénoïde de manière telle que la direction de l'aiguille aimantée et la direction de l'axe du solénoïde soient perpendiculaires. On fait ensuite passer un courant d'intensité I dans le solénoïde et on constate que l'aiguille dévie vers la droite de  $20^\circ$ .

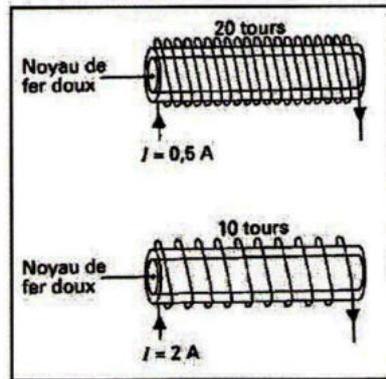
- Quel est le sens du courant ?
- Que vaut la grandeur du champ crée par le solénoïde (on suppose que le champ magnétique terrestre vaut  $2 \times 10^{-5} T$ ) ?
- Que vaut la grandeur du champ magnétique résultant du champ magnétique terrestre et du champ magnétique du solénoïde ?
- Si le solénoïde comporte 60 spires et si sa longueur vaut 30 cm, quel courant parcourt le solénoïde ? ( R : b)  $B_s = 7.2 \times 10^{-6} T$  ; c)  $B_{résultant} = 2.13 \times 10^{-5} T$  ; d)  $I = 2.9 \times 10^{-2} A$  )



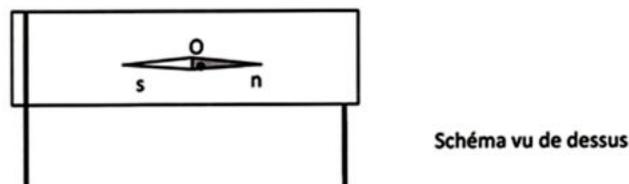
13) Identifier les pôles sur les solénoïdes suivants.



14) Déterminer lequel des électro-aimants est le plus puissant.



14) Un solénoïde de longueur  $L = 0,50 \text{ m}$  comportant  $N = 1200$  spires est traversé par un courant d'intensité  $I = 5 \text{ A}$ . Une aiguille aimantée placée dans le solénoïde prend la position indiquée sur le schéma ci-dessous.

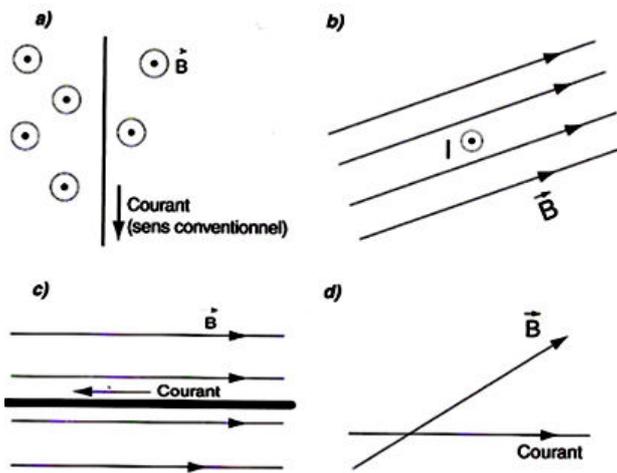


- 1) Tracer l'allure des lignes de champ du spectre magnétique à l'intérieur du solénoïde, puis représenter le vecteur champ magnétique en un point intérieur au solénoïde.
- 2) Calculer la valeur  $B$  du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde. La perméabilité magnétique du vide vaut :  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$
- 3) On souhaite à présent créer à l'intérieur de ce solénoïde un champ magnétique intense de valeur  $B = 0,5 \text{ T}$ .
  - a) Calculer l'intensité  $I$  du courant électrique qui devrait traverser le solénoïde pour créer un tel champ magnétique.
  - b) Si la résistance du fil constituant le solénoïde est  $R = 1,2 \Omega$ , calculer la puissance calorifique dégagée suite au passage du courant calculé en 3.a) et comparer cette puissance à un fer à repasser d'usage courant d'une puissance de  $1200 \text{ W}$ .

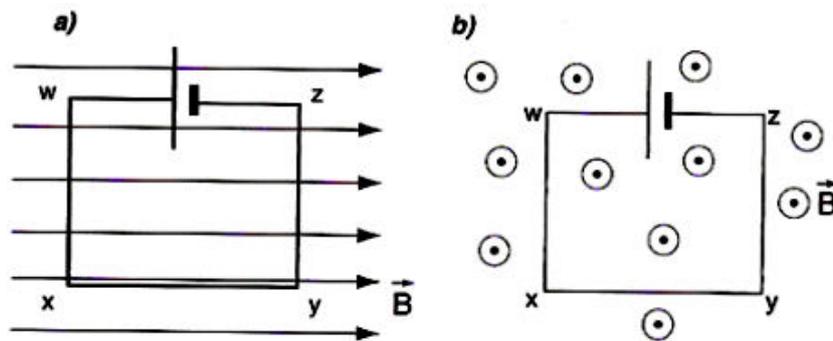
## 10.2 Force électromagnétique ou force de Laplace

### Série 1

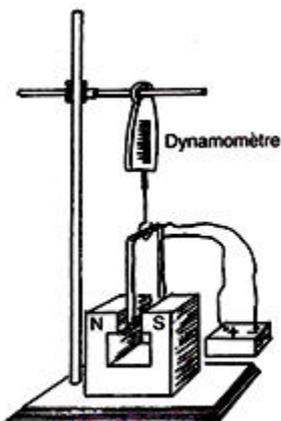
1 Pour chacune des situations décrites ci-après, indiquer, si nécessaire, l'orientation de la force électromagnétique



2.) Indiquer l'orientation de la force électromagnétique sur chaque portion des circuits illustrés ci-après

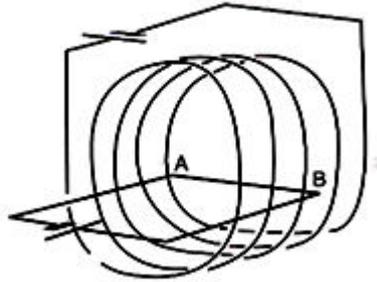


3) Le fil souple ci-contre est poussé à l'intérieur de l'aimant lorsqu'il est parcouru par un courant. Indiquer les pôles de chaque bras de l'aimant.

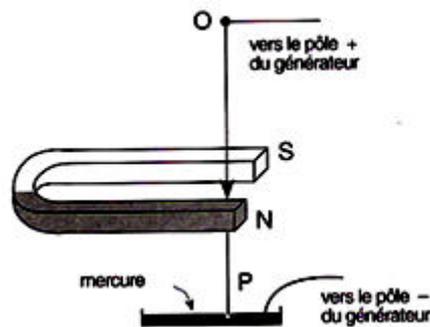


4) Un cadre isolant supporte les fils d'un circuit. Il est suspendu à un dynamomètre qui indique, en absence de courant, le seul poids du cadre et des fils. En présence de courant, dans quel sens varie l'indication du dynamomètre.

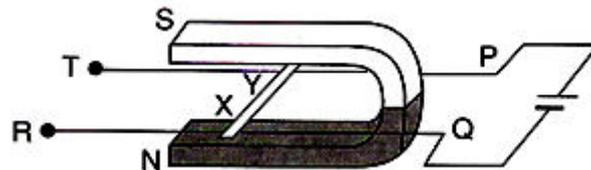
5) Préciser la direction et le sens de la force exercée sur  $AB$  lorsque les courants sont installés.



6) Dans un circuit électrique représenté ci-dessous, la tige de cuivre  $OP$  est mobile autour du point  $O$  et elle fait contact en  $P$  avec une surface de mercure (liquide métallique et donc conducteur). Indiquer le sens du déplacement de la tige dans l'entrefer d'un aimant en  $U$  lorsque le circuit électrique est fermé.



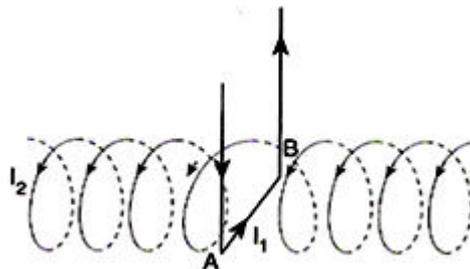
7) Dans le circuit électrique schématisé ci-dessous, la tige en aluminium  $XY$  peut rouler sur deux rails  $PT$  et  $QR$  situés dans le même plan horizontal. Elle est entièrement placée dans l'entrefer d'un aimant en  $U$  et sa longueur est de  $10\text{ cm}$ . Elle est parcourue par un courant d'intensité de  $5\text{ A}$  et la grandeur du champ  $\vec{B}$  régnant dans l'entrefer est de  $0.02\text{ T}$ .



- Représenter la force électromagnétique agissant sur le conducteur  $XY$ .
- Calculer le travail de cette force si le déplacement de la tige est de  $5\text{ cm}$ . ( $R : 5 \times 10^{-4}\text{ J}$ )

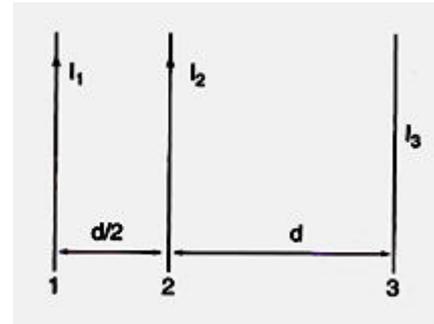
8) La tige horizontale  $AB$ , parcourue par un courant  $I_1$  est placée entre les pires d'un solénoïde parcouru par un courant  $I_2$  comme l'indique la figure.

- Représenter la force  $\vec{F}$  agissant sur  $AB$ .
- Donner deux moyens de modifier l'intensité de  $\vec{F}$  et les justifier.



9) Citer trois analogies et deux différences entre la force de Coulomb et la force électromagnétique.

10) Les conducteurs rectilignes de la figure ci-jointe sont placés parallèlement entre eux dans un même plan. Les conducteurs 1 et 2 sont parcourus par des courants circulant dans le même sens. Les conducteurs 1 et 3 sont fixés tandis que le conducteur 2 est libre de se déplacer.



Pour que le conducteur 2 reste en équilibre, déterminer :

- a) Le sens du courant électrique dans le conducteur 3
- b) Le rapport des intensités des courants  $I_1$  et  $I_3$ .

Les trois fils sont de même longueur.

### Réponses

- 1) a) vers la gauche    b) vers le haut et perpendiculaire à  $B$     c)  $F = 0$     d)  $\vec{F}$  est  $\odot$
- 4) Le dynamomètre indique une intensité moindre.
- 5) Vers le haut
- 6) Vers la droite
- 7) a) vers la gauche    b)  $5 \times 10^{-4} J$
- 10) a)  $I_3$  vers le haut    b)  $I_3 = 2 I_1$



### Série 2

1) On fait passer un courant de  $5 A$  à travers un fil dont  $40 cm$  sont dans un champ magnétique de  $0.02 T$ . Quelle est l'intensité de la force subie par le fil dans les trois cas suivants ?

- a) Le fil est perpendiculaire au champ magnétique. ( $0.04 N$ )
- b) Le fil est parallèle au champ magnétique. ( $0 N$ )
- c) Le fil fait un angle de  $30^\circ$  avec le champ magnétique. ( $0.02 N$ )

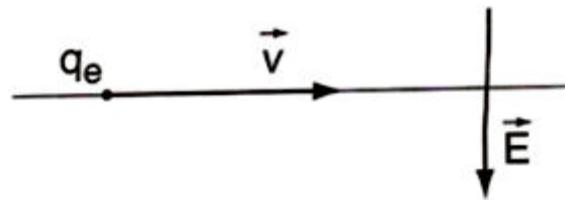
Quelle est la direction et le sens de la force subie par le fil, si le champ magnétique est perpendiculaire à cette feuille, son sens sort de la feuille (donc vers le haut), et le courant va de gauche à droite ?

(R :  $F$  est dirigée vers le bas)

2) Dans le cas de deux fils parallèles traversés chacun par un courant de  $1 A$ , de longueur  $1 m$  chacun et distant de  $1 m$ , quelle est l'intensité de la force d'interaction entre ces fils ? (R :  $2 \times 10^{-7} N$ )

3) On suspend un tronçon rectiligne de fil de cuivre dans un aimant en fer à cheval où il règne un champ magnétique de  $0.06 T$  et qu'on suppose limité à  $5 cm$  de la longueur du tronçon. Calculer l'intensité de la force électromagnétique si un courant de  $9.3 A$  circule dans ce tronçon.

6) Un électron se déplace dans une région où existe un champ électrique uniforme  $\vec{E}$  et un champ magnétique  $\vec{B}$ . Rechercher l'orientation de  $\vec{B}$  pour que l'électron ne soit ni dévié ni accéléré.



Démontrer que la vitesse est donnée par la relation  $v = \frac{E}{B}$

(Rép B est  $\otimes$ )

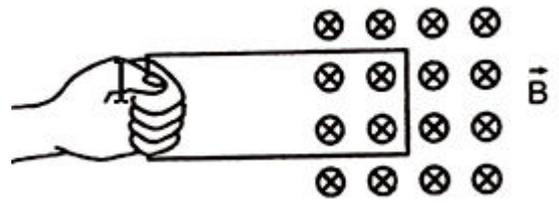
7) Dans un champ magnétique  $B = 0.5 \text{ T}$ , calculer le rayon du cercle décrit par un électron dont la vitesse est égale à un dixième de la vitesse de la lumière. Calculer en électronvolts son énergie cinétique.

(Rép :  $r = 0.34 \text{ mm}$ ,  $E = 2.559 \text{ keV}$ )

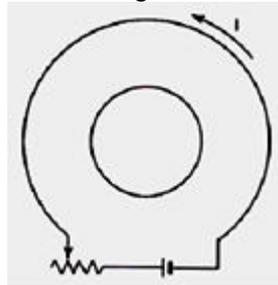
## 10.3 Induction électromagnétique

### Série 1

1) Dans la figure ci-contre, on tire la boucle conductrice rectangulaire vers la gauche hors du champ magnétique orienté vers l'intérieur de la page. Déterminer le sens dans lequel y circule le courant induit. (R : Sens horlogique)



2) En supposant qu'on accroît lentement la valeur de la résistance du circuit, déterminer le sens du courant induit dans la petite boucle circulaire placée à l'intérieur de la grande boucle. (R : Sens anti-horlogique)

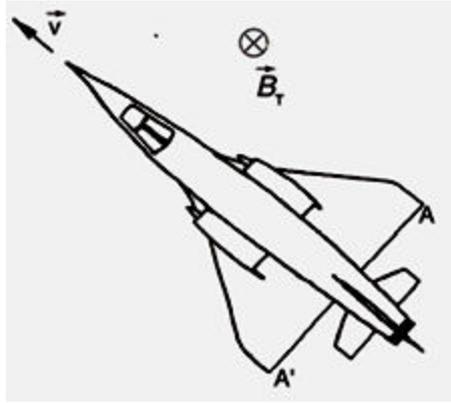


3) On retire en  $0.18 \text{ s}$  une boucle de fil circulaire mesurant  $7.0 \text{ cm}$  de diamètre d'un champ magnétique uniforme de  $0.25 \text{ T}$  qui s'oriente perpendiculairement à elle. Calculer la différence de potentiel induite moyenne. (R :  $5.34 \text{ mV}$ )

4) Le champ magnétique perpendiculaire à une boucle circulaire unique en cuivre mesurant  $12.0 \text{ cm}$  de diamètre décroît uniformément de  $0.350 \text{ T}$  à zéro  $\text{T}$ . En supposant que ce fil de cuivre a un diamètre de  $2.25 \text{ mm}$ , trouver la quantité d'électricité qui se déplace à travers la boucle durant cette variation. (R :  $2.64 \text{ C}$ )

5) Considérons un avion en vol qui se déplace dans le champ magnétique terrestre supposé uniforme d'intensité  $B_T = 4.5 \times 10^{-5} \text{ T}$ . Si les extrémités  $A$  et  $A'$  des ailes de l'avion sont distantes de  $40 \text{ mètres}$ , le conducteur rectiligne  $AA'$  se déplace à la vitesse  $\vec{v}$  (soit  $800 \text{ km/h}$ ) dans un plan perpendiculaire aux lignes du champ magnétique terrestre.

- Calculer la différence de potentiel induite qui s'établit entre les extrémités.
- De quel côté ( $A$  ou  $A'$ ) sont accumulés les charges négatives



(R : 0.4 V du côté A)

6) Un cadre rectangulaire de  $40 \text{ cm}^2$  comporte 500 spires. On le place parallèlement aux lignes d'un champ magnétique dont l'intensité vaut  $2.10^{-2} \text{ T}$  et on fait tourner d'un quart de tour en  $0.1 \text{ s}$ , autour d'un de ses côtés perpendiculaires au champ. Calculer la différence de potentiel induite moyenne au cours de la rotation. (R : 0.4 V)

7) Pour rechercher la norme du vecteur champ magnétique entre les pièces d'un électroaimant, un expérimentateur y place une bobine comportant 50 spires dont la résistance vaut 30 ohms et la section  $2 \text{ cm}^2$ . Les spires de la bobine sont perpendiculaires au champ. La bobine est brusquement retirée de l'entrefer et un appareil de mesure qui y est branché indique qu'il s'y produit un déplacement d'une quantité d'électricité de  $5 \times 10^{-4} \text{ C}$ . Calculer la valeur du champ magnétique. (R : 1.5 T)

8) a) Une bobine cylindrique de  $20 \text{ cm}$  de longueur comporte 120 spires de  $5 \text{ cm}$  de diamètre, parcourues par une intensité de courant de  $10 \text{ A}$ . Déterminer le flux magnétique à travers chaque spire, la bobine contenant de l'air.  
b) On enroule sur cette première bobine 20 spires d'un fil métallique de  $0.2 \text{ mm}^2$  de section et de résistivité valant  $50 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$ . La section de chaque spire est pratiquement la même que celle des spires de la première bobine. L'intensité du courant de  $16 \text{ A}$  étant établie, on coupe le circuit ; le courant met  $1/20$  de seconde pour s'annuler. Déterminer la valeur moyenne de la différence de potentiel induite dans la deuxième bobine et l'intensité du courant induit.

(R :  $1.5 \times 10^{-5} \text{ Wb}$  ;  $9.44 \text{ mV}$ ,  $0.12 \text{ A}$ )

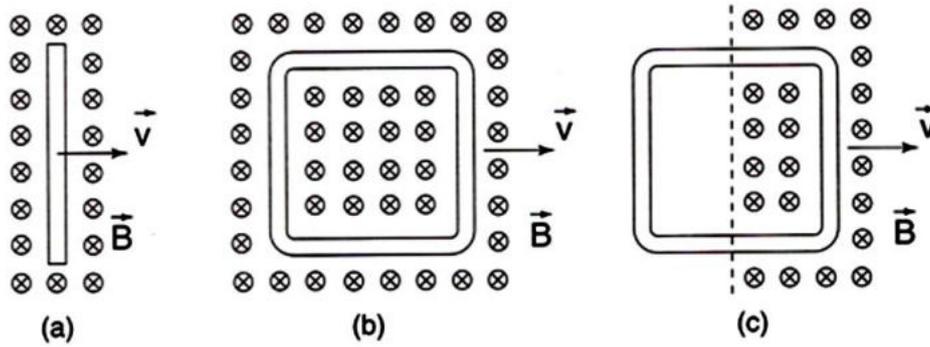
9) Une bobine plate comporte 100 spires dont le diamètre vaut  $4.0 \text{ cm}$ . Sa résistance vaut  $3 \Omega$ . Elle est placée entre les pôles d'un électroaimant perpendiculairement aux lignes de champ. Elle est connectée à un coulombmètre de  $417 \Omega$  de résistance. On la retire brusquement de l'entrefer. Le cadre du galvanomètre dévie et on mesure une quantité de courant de  $10^{-3} \text{ C}$  induite dans la bobine. Déterminer l'intensité du champ magnétique dans l'entrefer. (R : 3.0 T)

10) Un solénoïde ayant une longueur de  $40 \text{ cm}$  est une section de  $10 \text{ cm}^2$  comporte 100 spires parcourues par un courant de  $1 \text{ A}$ . L'intérieur est occupé par un noyau de fer qui a une perméabilité relative  $\mu_r = 200$ . Un interrupteur coupe le courant en  $1/100$  de seconde. Calculer la différence de potentiel induite. (R : 0.628 V)

11) Un noyau d'acier doux ( $\mu_r = 1.125 \times 10^4 \text{ Tm/A}$ ) de  $20 \text{ cm}^2$  de section et de  $25 \text{ cm}$  de longueur est recouvert de 400 spires dans lesquelles circule un courant dont l'intensité est de  $10 \text{ A}$ . Une seconde bobine de 100 spires dont la résistance est de  $6 \Omega$ , entoure la première (on peut considérer que les bobines ont même section). Un interrupteur coupe le courant en  $1/50$  de seconde.

Déterminer la différence de potentiel induite et l'intensité du courant induit engendré dans la seconde. (R : 18 V ; 3 A)

12) Dans les différentes situations représentées ci-dessous, utiliser la force électromagnétique pour justifier la présence ou non d'un courant induit.



- a) Soit un conducteur que l'on déplace latéralement dans un champ magnétique.
- b) Soit un circuit fermé voyageant dans un champ magnétique.
- c) Soit un circuit fermé pénétrant dans un champ magnétique.

Dans chaque cas expliciter la réponse.

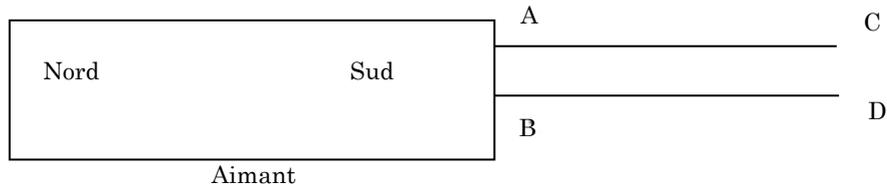
13) Une bobine assimilable à un solénoïde, parcourue par un courant d'intensité  $I = 2.5 \text{ A}$ , embrasse un flux  $\Phi = 0.35 \text{ Wb}$ . Calculer l'inductance de la bobine et le nombre de spires connaissant la longueur de la bobine ( $50 \text{ cm}$ ) et le diamètre des spires ( $6.2 \text{ cm}^2$ ) ( $\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$ ) (R :  $0.14 \text{ H}$  ; 4310 spires)



## 10.4 Olympiades de physique

### Qualifications sixième, 2002

1. Plaçons à l'extrémité d'un aimant droit, du côté de son pôle Sud, deux tiges de fer AC et BD, comme l'indique la figure ci-dessous. Les extrémités C et D des deux barres de fer vont immédiatement :
- s'écarter l'une de l'autre,
  - se rapprocher l'une de l'autre,
  - rester parallèles entre elles.

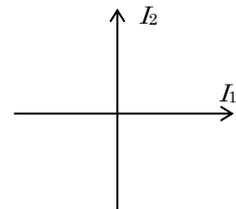


(R : c)

2. Un solénoïde  $S_1$  comporte 1000 spires de fil conducteur enroulées sur un cylindre d'un mètre de long. Un deuxième solénoïde  $S_2$  comporte 700 spires enroulées sur un cylindre de 70 cm de long. Les deux solénoïdes sont parcourus par la même intensité de courant électrique.  $B_1$  est la valeur du champ magnétique à l'intérieur de  $S_1$  et  $B_2$ , la valeur du champ magnétique à l'intérieur de  $S_2$ . Cochez l'affirmation correcte :
- $B_2 > B_1$ .
  - $B_1 > B_2$ .
  - $B_1 = B_2$ .
- (R : c)

### Qualifications sixième, 2003

Soient deux fils conducteurs rectilignes et perpendiculaires l'un à l'autre parcourus par deux courants  $I_1$  et  $I_2$  de même intensité. Les fils se superposent sans connexion (voir schéma ci-contre). En quel lieu du plan défini par ces deux fils le champ magnétique total dû aux deux courants est-il nul ?

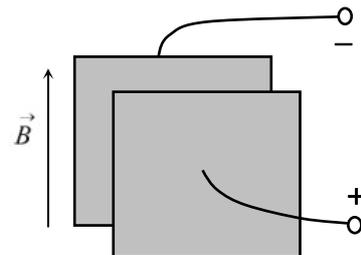


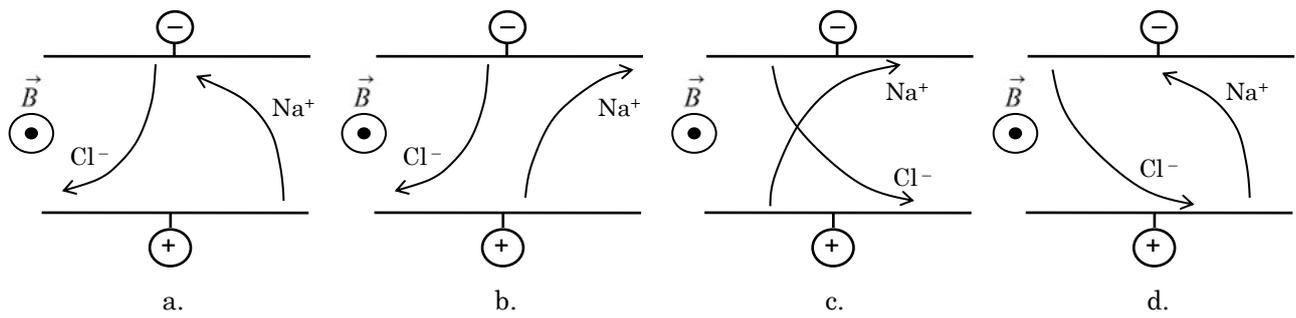
- Un seul point.
- Deux points.
- La bissectrice des deux fils (quadrants I et III).
- Les deux bissectrices des deux fils.
- Une ligne parallèle à l'un des axes.

(R : c)

### Qualifications sixième, 2004

Deux plaques métalliques sont utilisées comme électrodes et plongées dans de l'eau salée. On connecte les deux plaques à une alimentation électrique qui maintient entre les deux plaques une intensité de courant constante. Le récipient dans lequel baignent les deux électrodes parallèles est par ailleurs soumis à un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$  dont la direction est verticale et orienté de bas en haut. Quel est, parmi les quatre schémas proposés ci-dessous (vus de haut), celui qui représente le mieux le déplacement des ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  dans le liquide ?

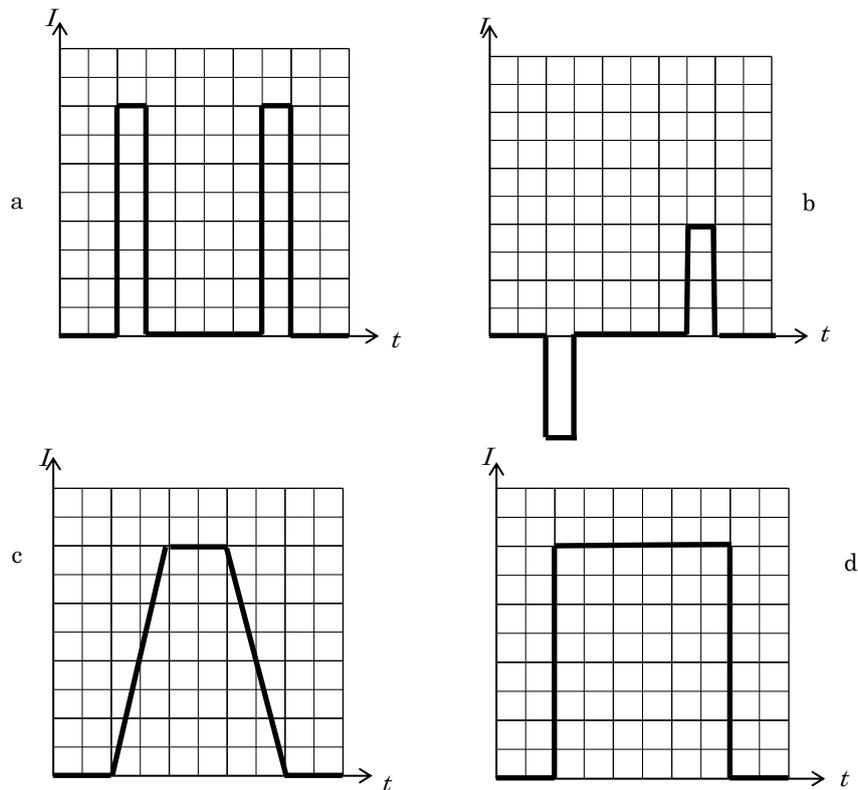
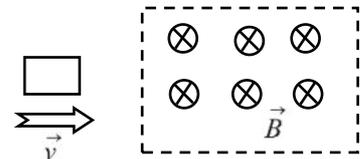




(R : c)

**Qualifications sixième, 2006**

Un fil de cuivre fermé sur lui-même en forme de petit rectangle est déplacé à vitesse constante  $\vec{v}$ , comme indiqué sur le schéma ci-contre. Sur une partie de son trajet (entourée par un rectangle en pointillés sur le schéma), il traverse un champ magnétique constant  $\vec{B}$  dont la direction est constamment perpendiculaire à la surface du petit circuit. Choisir le schéma qui représente le mieux le courant  $I$  induit dans le circuit au cours du temps.



(R : b)



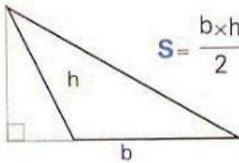
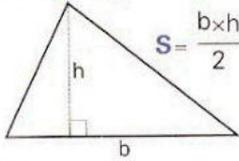
# Annexes

## Géométrie

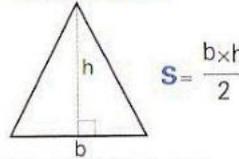
### Géométrie

#### Les aires (S)

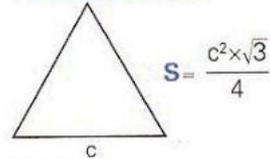
Triangles quelconques



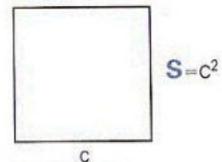
Triangle isocèle



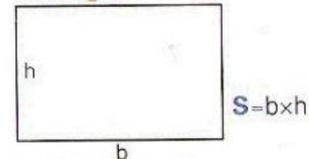
Triangle équilatéral



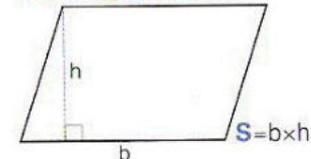
Carré



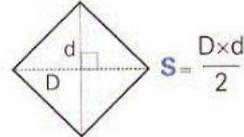
Rectangle



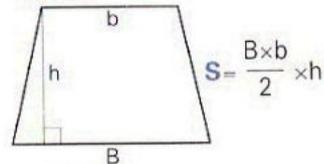
Parallélogramme



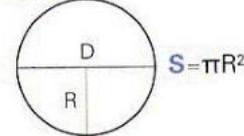
Losange



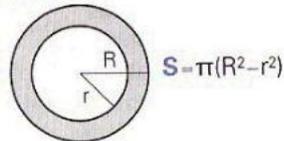
Trapèze



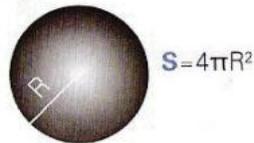
Cercle



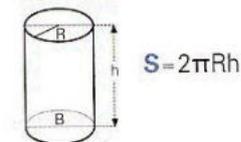
Couronne



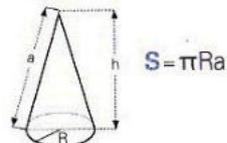
Sphère



Cylindre

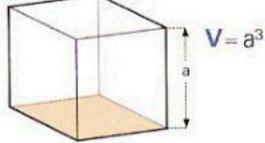


Cône

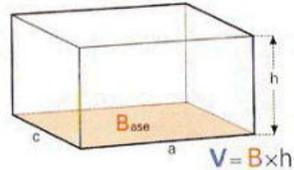


#### Les volumes (V)

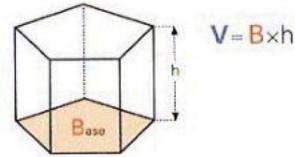
Cube



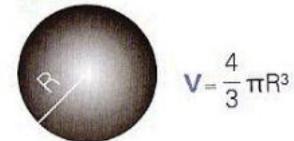
Parallélépipède droit



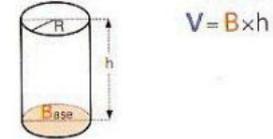
Prisme droit



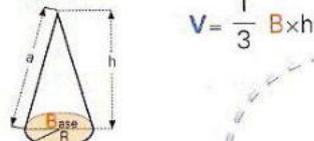
Sphère



Cylindre



Cône



# Mathématique

## Formules mathématiques\*

### Géométrie

Triangle de base $b$ et de hauteur $h$	Aire = $\frac{1}{2}bh$	
Cercle de rayon $r$	Circonférence = $2\pi r$	Aire = $\pi r^2$
Sphère de rayon $r$	Aire de la surface = $4\pi r^2$	Volume = $\frac{4}{3}\pi r^3$
Cylindre de rayon $r$ et de hauteur $h$	Aire de la surface courbe = $2\pi rh$	Volume = $\pi r^2 h$

### Algèbre

Si  $ax^2 + bx + c = 0$ , alors  $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$

Si  $x = a^y$ , alors  $y = \log_a x$ ;  $\log(AB) = \log A + \log B$

### Produits vectoriels

Produit scalaire:  $\vec{A} \cdot \vec{B} = AB \cos \theta$   
 $= A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z$

Produit vectoriel:

$$\vec{A} \times \vec{B} = (A_x \vec{i} + A_y \vec{j} + A_z \vec{k}) \times (B_x \vec{i} + B_y \vec{j} + B_z \vec{k})$$

$$= (A_y B_z - A_z B_y) \vec{i} + (A_z B_x - A_x B_z) \vec{j} + (A_x B_y - A_y B_x) \vec{k}$$

### Trigonométrie

$$\sin(90^\circ - \theta) = \cos \theta; \quad \cos(90^\circ - \theta) = \sin \theta$$

$$\sin(-\theta) = -\sin \theta; \quad \cos(-\theta) = \cos \theta$$

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1; \quad \sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$$

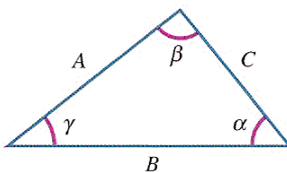
$$\sin(A \pm B) = \sin A \cos B \pm \cos A \sin B$$

$$\cos(A \pm B) = \cos A \cos B \mp \sin A \sin B$$

$$\sin A \pm \sin B = 2 \sin\left(\frac{A \pm B}{2}\right) \cos\left(\frac{A \mp B}{2}\right)$$

Loi des cosinus  $C^2 = A^2 + B^2 - 2AB \cos \gamma$

Loi des sinus  $\frac{\sin \alpha}{A} = \frac{\sin \beta}{B} = \frac{\sin \gamma}{C}$



### Approximations du développement en série (pour $x \ll 1$ )

$$\left. \begin{array}{ll} (1+x)^n \approx 1 + nx & \sin x \approx x - \frac{x^3}{3!} \\ e^x \approx 1 + x & \cos x \approx 1 - \frac{x^2}{2!} \\ \ln(1 \pm x) \approx \pm x & \tan x \approx x - \frac{x^3}{3} \end{array} \right\} (x \text{ en radians})$$

\* Une liste plus complète est donnée à l'annexe B.

## Constantes physiques

### Constantes physiques

Nom	Symbole	Valeur approchée	Valeur précise*
Charge élémentaire	$e$	$1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$	$1,602\ 177\ 33(49) \times 10^{-19} \text{ C}$
Constante de Boltzmann	$k = R/N_A$	$1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$	$1,380\ 658(12) \times 10^{-23} \text{ J/K}$
Constante de gravitation	$G$	$6,672 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$	$6,672\ 59(85) \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$
Constante de la loi de Coulomb	$k (= 1/4\pi\epsilon_0)$	$9,00 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$	$8,987\ 551\ 8 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$
Constante de Planck	$h$	$6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$	$6,626\ 075\ 5(40) \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
Constante des gaz parfaits	$R$	$8,314 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$	$8,314\ 510(70) \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$
Masse de l'électron	$m_e$	$9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$	$9,109\ 389\ 7(54) \times 10^{-31} \text{ kg}$
Masse du proton	$m_p$	$1,672 \times 10^{-27} \text{ kg}$	$1,672\ 623\ 1(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$
Nombre d'Avogadro	$N_A$	$6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	$6,022\ 136\ 7(36) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Perméabilité du vide	$\mu_0$	–	$4\pi \times 10^{-7} \text{ N}/\text{A}^2$ (exacte)
Permittivité du vide	$\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$	$8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N}\cdot\text{m}^2)$	$8,854\ 187\ 818 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N}\cdot\text{m}^2)$
Unité de masse atomique	$u$	$1,661 \times 10^{-27} \text{ kg}$	$1,660\ 540\ 2(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$
Vitesse de la lumière dans le vide	$c$	$3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$	$2,997\ 924\ 58 \times 10^8 \text{ m/s}$ (exacte)

\* E. Richard Cohen et B. N. Taylor, *Reviews of Modern Physics*, vol. 59, n° 4, octobre 1987, p. 1121. Les nombres entre parenthèses indiquent l'incertitude sur les deux derniers chiffres.

### Abréviations des unités courantes

Ampère	A	Kelvin	K
Année	a	Kilocalorie	kcal (Cal)
Ångström	Å	Kilogramme	kg
Atmosphère	atm	Livre	lb
British thermal unit	Btu	Mètre	m
Candela	cd	Minute	min
Coulomb	C	Mole	mol
Degré Celsius	°C	Newton	N
Degré Fahrenheit	°F	Ohm	$\Omega$
Électronvolt	eV	Pascal	Pa
Farad	F	Pied	pi
Gauss	G	Pouce	po
Gramme	g	Seconde	s
Heury	H	Tesla	T
Heure	h	Unité de masse atomique	u
Horse-power	hp	Volt	V
Hertz	Hz	Watt	W
Joule	J	Weber	Wb

**Données d'usage fréquent**

Terre		
Rayon moyen		$6,37 \times 10^6$ m
Masse		$5,98 \times 10^{24}$ kg
Distance moyenne au Soleil		$1,50 \times 10^{11}$ m
Lune		
Rayon moyen		$1,74 \times 10^6$ m
Masse		$7,36 \times 10^{22}$ kg
Distance moyenne à la Terre		$3,84 \times 10^8$ m
Soleil		
Rayon moyen		$6,96 \times 10^8$ m
Masse		$1,99 \times 10^{30}$ kg
Accélération de chute libre ( $g$ ), valeur recommandée		$9,806\ 65$ m/s <sup>2</sup>
Pression atmosphérique normale		$1,013 \times 10^5$ Pa
Masse volumique de l'air (à 0°C et 1 atm)		$1,293$ kg/m <sup>3</sup>
Masse volumique de l'eau (entre 0°C et 20°C)		$1000$ kg/m <sup>3</sup>
Chaleur spécifique de l'eau		$4186$ J/(kg·K)
Vitesse du son dans l'air	(0°C)	$331,5$ m/s
à la pression atmosphérique normale	(20°C)	$343,4$ m/s

**Préfixes des puissances de dix**

Puissance	Préfixe	Abréviation	Puissance	Préfixe	Abréviation
$10^{-18}$	atto	a	$10^1$	déca	da
$10^{-15}$	femto	f	$10^2$	hecto	h
$10^{-12}$	pico	p	$10^3$	kilo	k
$10^{-9}$	nano	n	$10^6$	méga	M
$10^{-6}$	micro	$\mu$	$10^9$	giga	G
$10^{-3}$	milli	m	$10^{12}$	téra	T
$10^{-2}$	centi	c	$10^{15}$	péta	P
$10^{-1}$	déci	d	$10^{18}$	exa	E

**Symboles mathématiques**

$\propto$	est proportionnel à
$>$ ( $<$ )	est plus grand (plus petit) que
$\geq$ ( $\leq$ )	est plus grand (plus petit) ou égal à
$\gg$ ( $\ll$ )	est beaucoup plus grand (plus petit) que
$\approx$	est approximativement égal à
$\Delta x$	la variation de $x$
$\sum_{i=1}^N x_i$	$x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_N$
$ x $	le module ou la valeur absolue de $x$
$\Delta x \rightarrow 0$	$\Delta x$ tend vers zéro
$n!$	factorielle $n$ : $n(n-1)(n-2) \dots 2 \times 1$

**Facteurs de conversion****Longueur**

1 po = 2,54 cm (exactement)  
 1 m = 39,37 po = 3,281 pi  
 1 mille (mi) = 5280 pi = 1,609 km  
 1 km = 0,6215 mille  
 1 fermi (fm) =  $1 \times 10^{-15}$  m  
 1 ångström (Å) =  $1 \times 10^{-10}$  m  
 1 mille marin = 6076 pi = 1,151 mille  
 1 unité astronomique (UA) =  $1,4960 \times 10^{11}$  m  
 1 année-lumière =  $9,4607 \times 10^{15}$  m

**Aire**

1 m<sup>2</sup> = 10<sup>4</sup> cm<sup>2</sup> = 10,76 pi<sup>2</sup>  
 1 pi<sup>2</sup> = 0,0929 m<sup>2</sup>  
 1 po<sup>2</sup> = 6,452 cm<sup>2</sup>  
 1 mille<sup>2</sup> = 640 acres  
 1 hectare (ha) = 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup> = 2,471 acres  
 1 acre (ac) = 43 560 pi<sup>2</sup>

**Volume**

1 m<sup>3</sup> = 10<sup>6</sup> cm<sup>3</sup> = 6,102 × 10<sup>4</sup> po<sup>3</sup>  
 1 pi<sup>3</sup> = 1728 po<sup>3</sup> = 2,832 × 10<sup>-2</sup> m<sup>3</sup>  
 1 l. = 10<sup>3</sup> cm<sup>3</sup> = 0,0353 pi<sup>3</sup>  
     = 1,0576 pinte (É.-U.)  
 1 pi<sup>3</sup> = 28,32 L = 7,481 gallons É.-U. = 2,832 × 10<sup>-2</sup> m<sup>3</sup>  
 1 gallon (gal) É.-U. = 3,786 l. = 231 po<sup>3</sup>  
 1 gallon (gal) impérial = 1,201 gallon É.-U. = 277,42 po<sup>3</sup>

**Masse**

1 unité de masse atomique (u) =  $1,6605 \times 10^{-27}$  kg  
 1 tonne (t) = 10<sup>3</sup> kg  
 1 slug = 14,59 kg  
 1 tonne É.-U. = 907,2 kg

**L'alphabet Grec**

Alpha	A	α	Iota	I	ι	Rho	Ρ	ρ
Bêta	B	β	Kappa	K	κ	Sigma	Σ	σ
Gamma	Γ	γ	Lambda	Λ	λ	Tau	Τ	τ
Delta	Δ	δ	Mu	Μ	μ	Upsilon	Υ	υ
Epsilon	Ε	ε	Nu	Ν	ν	Phi	Φ	φ ou ϕ
Zêta	Z	ζ	Xi	Ξ	ξ	Khi	Χ	χ
Èta	Η	η	Omicron	Ο	ο	Psi	Ψ	ψ
Thêta	Θ	θ	Pi	Π	π	Oméga	Ω	ω

**Temps**

1 jour = 24 h =  $1,44 \times 10^2$  min =  $8,64 \times 10^4$  s  
 1 a = 365,24 jours =  $3,156 \times 10^7$  s

**Force**

1 N = 10<sup>5</sup> dynes = 0,2248 lb  
 1 lb = 4,448 N  
 Le poids de 1 kg correspond à 2,205 lb.

**Énergie**

1 J = 10<sup>7</sup> ergs = 0,7376 pi·lb  
 1 eV =  $1,602 \times 10^{-19}$  J  
 1 cal = 4,186 J; 1 Cal = 4186 J (1 Cal = 1 kcal)  
 1 kW·h =  $3,600 \times 10^6$  J = 3412 Btu  
 1 Btu = 252,0 cal = 1055 J  
 1 u est équivalent à 931,5 MeV

**Puissance**

1 hp = 550 pi·lb/s = 745,7 W  
 1 cheval-vapeur métrique (ch) = 736 W  
 1 W = 1 J/s = 0,7376 pi·lb/s  
 1 Btu/h = 0,2931 W

**Pression**

1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup> =  $1,450 \times 10^{-4}$  lb/po<sup>2</sup>  
 1 atm = 760 mm Hg =  $1,013 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup> = 14,70 lb/po<sup>2</sup>  
 1 bar = 10<sup>5</sup> Pa = 0,9870 atm  
 1 torr = 1 mm Hg = 133,3 Pa



# Index

## A

Aimant naturel, 90  
 Aimants  
   Artificiels, 90  
   Bris des, 91  
   Conservation des, 92  
   Interactions entre pôles, 91  
   Naturels, 90  
   Sortes, 90  
 Aimants, 90  
 Alternateurs industriels, 132  
 Ampère  
   André-Marie, 46  
   définition, 112  
 Ampère-heure, 47  
 Ampèremètre, 49  
 Analogie hydraulique, 43  
 Appareil de chauffage électrique, 54  
 Applications des courants induits, 121  
 Aurore boréale, 95  
 Auto-induction, 126

## C

Cage de Faraday, 18  
 Capacité  
   Effet de, 147  
 Champ de gravitation, 22  
 Champ de pesanteur, 22  
 Champ électrique  
   Applications, 33  
   Champ uniforme, 28  
   Charges non ponctuelles, 28  
   Définition, 23  
   En médecine, 34  
   En zoologie, 34  
   Exemples, 24  
   Ligne de, 25  
   Mouvement d'un charge, 32  
   Notion, 22  
   Ordres de grandeurs, 24  
   Principe de superposition, 25  
   Représentation, 25  
   Unité V/m, 32  
   Vecteur, 23  
 Champ magnétique  
   Définition, 93  
   Ligne de, 93  
   Mouvement d'une particule chargée, 109  
   Notion, 92  
   Ordre de grandeurs, 94  
   Terrestre, 95  
   Uniforme, 95  
   Vecteur, 93  
 Champ uniforme, 28  
**Charge électrique**, 6  
**Charge électromagnétique**, 6  
 Charge placée entre 2 plaques //, 31  
 Charge témoin, 23

## Chute de tension, 45

Circuit C, 143  
 Circuit électrique, 44  
 Circuit fermé complet, 71  
 Circuit L, 140  
 Circuit R, 140  
 Circuit RLC, 148  
 Circuits en courant alternatif, 139  
 Coefficient de self induction d'une bobine, 127  
 Condensateur en courant alternatif, 145  
 Condensateurs  
   En parallèle, 145  
   En série, 145  
   Tension alternative appliquée à, 143  
 Condensateurs, 143  
 Conducteur et isolant, 9  
 Constante de Coulomb, 19  
 Constantes physiques, 162  
 Corps humain, 10  
 Coulomb  
   Charles Augustin, 18  
   Constante de, 19  
   Loi de, 18  
   Unité de charge, 9, 19  
 Coupe-circuit, 55  
 Courant alternatif  
   Condensateur, 145  
   Effet biologique, 133  
   Effet calorifique, 134  
   Effet chimique, 133  
   Effet magnétique, 133  
   Production, 129  
   Tension induite, 129  
 Courant alternatif  
   Circuit, 139  
 Courant circulaire  
   Face nord et face sud, 98  
   Lignes de champ, 97  
   Magnétisme, 97  
 Courant électrique  
   Analogie hydraulique, 43  
   Notion, 42  
 Courant électrique, 45  
 Courant induit  
   Production, 114  
 Courant rectiligne  
   Champ d'induction magnétique, 96  
   Magnétisme, 96  
 Courants alternatifs, 129  
 Courants de Foucault, 124  
 Courants induits, 113  
 Courts-circuits, 54  
 Cristaux liquides, 33  
 Cuisinière à induction, 124  
 Cyclotrons, 111

## D

Danger de l'électricité, 75  
**Déclinaison magnétique**, 91  
 Différence de potentiel

Entre 2 points, 30  
 Différence de potentiel, 45  
 Différence de potentiel efficace, 135  
 Différence de potentiel électrique, 29  
 Disjoncteur  
   Différentiel, 74  
 Disjoncteur, 55, 73  
 Disjoncteurs, 102  
 Distribution des charges sur un conducteur, 14  
 Dynamo, 123

## E

Eclairage électrique par incandescence, 55  
 Effet Faraday, 18  
 Effet joule  
   Applications, 53  
 Effet joule, cause, 53  
**Electricité négative**, 8  
**Electricité positive**, 8  
 Electrification  
   Par frottement, 5  
   Par influence, 12  
 Electrification  
   Par contact, 7  
 Electrifications, 5  
 Electro-aimant, 101  
 Electroaimant porteur, 101  
 Electrocinétique  
   compétences, 42  
   savoirs, 42  
 Electromagnétisme  
   Compétences, 89  
   Exercices, 149  
   Savoirs, 89  
 Electron, 7, 9  
 Electrons libres, 9  
 Electron-volt, 32  
 Electroscope, 12  
 Electrostatique  
   Compétences, 5  
   Savoirs, 5  
 Energie, 50  
 Energie potentielle électrique, 29  
 Eruptions solaires, 95  
 Exercices  
   Effet Joule, 76  
   Electrostatique, 35  
   Force électromagnétique, 151  
   Générateurs, 81  
   Induction électromagnétique, 155  
   Loi d'Ohm, 76  
   Magnétisme, 149  
   Récepteurs, 81  
   Résistances, 77  
   Supplémentaires d'électrocinétique, 82  
 Exercices, 76

## F

Farad, 144  
 Faraday  
   Cage de, 18

Effet de, 18  
   Michael, 18  
 Fil de terre, 75  
 Filtre  
   Passe-bas, 142  
   Passe-haut, 147  
 Flash électronique, 144  
 Flux magnétique, 116  
 Force  
   De Coulomb, 19  
   De Laplace, 104  
   Electromagnétique, 104  
 Force  
   Electrique, 18  
**Force électrique**, 6, 18  
 Force électromagnétique  
   Exercices, 151  
 Force électromagnétique, 105  
 Force nucléaire forte, 22  
 Forces de freinage, 125  
 Forces électrique et gravitationnelle, 21  
 Foucault  
   Courants de, 124  
 Foudre, 16  
 Four à induction, 124  
 Franklin, Benjamin, 15  
 Fréquence, 131  
 Fusible, 74  
 Fusibles, 55

## G

Galvanomètre à cadre mobile, 109  
 Générateur, 44, 65  
 Générateurs  
   Groupement en parallèle, 69  
   Groupement en série, 68  
 Générateurs  
   Groupements, 68  
 Géométrie, 160  
 Gramme Zénobe, 123  
 Grandeurs efficaces, 134  
 Groupements de GN, 68

## H

Haut-parleur, 107  
 Henry, unité, 128

## I

Impédance, 141  
 imprimante laser, 12  
 Inducteur, 113  
 Induction électromagnétique  
   Exercices, 155  
 Induction électromagnétique, 113  
 Induit, 113  
 Installation domestique, 73  
 Intensité, 46  
 Intensité efficace, 134  
 Interaction entre plusieurs charges, 19  
 Interactions entre 2 fils parallèles, 112

Interprétation de l'aimantation, 103  
 Interrupteurs automatiques, 101  
 Ion négatif, 7  
 Ion positif, 7  
 isolants, 10

**J**

Joule  
 James Prescott, 53  
 Loi de, 52

**K**

Kirchhoff  
 Gustav Robert, 63  
 Loi de, 63

**L**

**Laplace Pierre-Simon**, 104  
 Lenz  
 Heinrich Friedrich Emil, 119  
 Lignes de champ électrique, 25  
 Loi  
 d'Ohm, 48  
 D'Ohm pour un GN, 67  
 De Coulomb, 18  
 De Faraday, 118  
 De Joule, 52  
 De Kirchhoff, 63  
 De Lenz, 119  
 De Pouillet, 51  
 Des intensités, 59  
 Des mailles, 64  
 Des nœuds, 64  
 Loi de Lenz  
 vérification, 119  
 Loi du transformateur, 137

**M**

machine de Wimshurst, 6  
 Magnétisme  
 Exercices, 149  
 Magnétisme, 89, 90  
 Magnéto, 123  
 Magnéto de vélo, 123  
 Magnétophone, 103, 122  
 Mathématique, 161  
 Microphone, 121  
 Mise à la terre, 10  
 Mise à la terre des appareils ménagers, 10  
 Modèle atomique  
 Electrification, 7  
 Modèle atomique, 7  
 Modèle d'Ampère, 103  
 Molécule d'eau, 33  
 Moteur électrique, 108  
 Moteur électrique et transformateur, 125  
 Mouvement d'une charge  
 Dans un champ électrique, 32

**O**

Ohm  
 Georg Simon, 48  
 Unité, 48  
 Olympiades de physique  
 Electromagnétisme, 158  
 Olympiades de physique  
 Electrocinétique, 85  
 Olympiades de Physique  
 Electrostatique, 40

**P**

Paratonnerre, 14, 15  
 Période, 131  
**Perméabilité magnétique**  
 définition, 97  
 Du vide, 97  
 Relative, 97  
 Permittivité  
 Définition, 24  
 Du vide, 24  
 Relative, 24  
 Phénomènes magnétiques, 90  
 Photocopieuse, 12  
 Piles, 44, 47  
**Pôle magnétique**, 95  
 Potentiel électrique  
 En un point, 29  
 Pouillet  
 Claude Servais, 51  
 Loi de, 51  
 Pouvoir des pointes, 14  
 Principe de superposition  
 Champs électriques, 25  
 Force de Coulomb, 19  
 Production d'un courant à partir d'un aimant, 113  
 Production de basse tension, 138  
 Production de courants induits, 114  
 Protection contre la foudre, 16  
 Puissance, 50  
 Puissance, 135

**R**

**Rapport de transformation**, 137  
 Récepteur  
 Résistance interne, 69  
 Récepteur, 44  
 Récepteurs, 69  
Règle  
 De la main droite, 96  
 De la main gauche, 105  
 Relais, 102  
 Résistance  
 Interne, 65  
 Résistance, 48, 57  
 Résistances  
 Associations, 61  
 En parallèle, 59  
 En série, 57  
 Résistivité, 51

Résistor, 57

## S

sections des fils électriques, 52

Self

Effet de, 142

Self induction, 126

Self-induction

Valeur, 127

Solénoïde

Définition, 99

Induction magnétique, 100

Sonnette électrique, 102

Soudure par point, 138

Spectre électrique, 25

Spectre magnétique, 94

Spectromètre de masse, 110

Stabilité de la molécule d'hydrogène, 21

Stabilité d'un noyau, 22

Surfaces équipotentiellles, 31

## T

Tension aux bornes d'un GN, 66

Tension aux bornes du récepteur, 70

Tension contre-électromotrice, 69

Tension électromotrice, 65

Tension électromotrice due au mouvement, 121

Tesla, 93

Tête de lecture, 122

Théorie des circuits, 63

**Tourniquet électrostatique, 14**

Transformateur

Loi du, 137

Transformateurs

Applications, 138

Description, 136

Transformateurs, 136

Transport de l'énergie, 138

Tube à rayons cathodiques, 33

Turbines, 132

## U

Unité

Ampère, 46

Ampère-heure, 47

Electron-Volt, 32

Farad, 144

Kilowatt-heure, 50

Ohm, 48

Tesla, 93

V/m, 32

Volt, 45

Weber, 116

Unité d'inductance, 128

## V

Valeur de la tension induite, 118

Vecteur champ électrique, 23

Vélo, 123

Vitesse des électrons, 48

Volt par mètre, 32

Volt, unité, 30

## W

Weber

Unité, 116

Wihelm Eduard, 116

Wimshurst Voir Machine de Wimhurst

