

Physique

Électricité
&
Magnétisme
DE

Préambule :

Ce cours d'électricité et de magnétisme a été écrit au début avec le logiciel de PAO Lyx, une interface graphique au célèbre Latex et aujourd'hui directement en latex. Il a donc été créé dans un environnement (ces deux logiciels tournant sous GNU-Linux) libre dont l'objectif est de contribuer au progrès en mettant à disposition de chacun, pour un coût moindre, le travail de milliers de programmeurs bénévoles. Dans ce cadre, il était naturel de permettre à chaque étudiant d'avoir accès à ce cours librement. C'est pourquoi, à l'instar des logiciels, il est distribué sous licence GFDL, licence de documentation libre. Attention cependant aux images qui ne sont pas toute sous licence GFDL, mais peuvent être soumise à une autre licence libre ou être dans le domaine public. Cela peut avoir une importance dans certains cas.

Normalement la licence GFDL doit figurer avec le cours. Ce n'est pas le cas ici et ce pour ne pas allonger trop le texte. Mais, le texte de la GFDL se trouve partout sur internet et il suffit d'un moteur de recherche pour le trouver. Par ailleurs, le texte de ce cours est disponible en téléchargement à l'adresse

<http://www.cvgg.org>

Pour tout renseignement complémentaire s'adresser à :

Vincent Guyot

Chapeau-Râblé 37

2300 La Chaux-de-Fonds

vincent@cvgg.org

Copyright 2007 Guyot Vincent

Permission vous est donnée de copier, distribuer et/ou modifier ce document selon les termes de la Licence GNU Free Documentation License, Version 1.1 ou ultérieure publiée par la Free Software Foundation ; avec les sections inaltérables suivantes :

Pas de section inaltérable

avec le texte de première page de couverture suivant :

Physique Électricité & Magnétisme

avec le texte de dernière page de couverture suivant :

Pas de texte de dernière page de couverture

Une copie transparente de ce document se trouve à l'adresse suivante :

<http://www.cvgg.org/Accueil/Physique/>

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement l'encyclopédie Wikipedia pour les nombreuses illustrations dont ce cours a pu bénéficier. Elle rend accessible gratuitement à tous des savoirs importants.

L'image de couverture de cet ouvrage se trouve à l'adresse suivante :

http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Voltaic_pile_battery.png

Cette image est particulièrement adaptée à ce cours. Il s'agit d'un dessin de la pile d'Alessandro Volta. Elle était constituée d'éléments composés d'un disque de cuivre et d'un autre de zinc ou d'argent séparés par un disque de chiffon trempé dans de l'acide ou de la saumure. Un ensemble de 23 éléments de ce type aurait produit environ 36 volts.

Table des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 15 |
| 1.1 | Introduction | 15 |
| 1.2 | Rappels | 16 |
| 1.2.1 | Les lois de Newton | 16 |
| | Première loi (loi d'inertie) | 16 |
| | Deuxième loi (principe fondamental) | 16 |
| | Troisième loi (action et réaction) | 16 |
| 1.2.2 | La loi de la gravitation universelle | 16 |
| 1.2.3 | Conclusion | 16 |
| 2 | Électrostatique | 17 |
| 2.1 | Introduction | 17 |
| 2.2 | La loi de Coulomb | 17 |
| 2.2.1 | La charge électrique | 17 |
| 2.2.2 | Le pendule électrique | 17 |
| | Description de l'expérience | 17 |
| | Explications | 17 |
| 2.2.3 | Les isolants | 19 |
| 2.2.4 | L'électroscope | 19 |
| | Description de l'expérience | 19 |
| | Explications | 19 |
| 2.2.5 | Charge par influence | 20 |
| | Description de l'expérience | 20 |
| | Explications | 20 |
| 2.2.6 | La machine de Van de Graaff | 20 |
| | Description de l'expérience | 20 |
| | Explications | 20 |
| 2.2.7 | La machine de Wimshurst | 21 |
| 2.2.8 | La foudre | 21 |
| 2.2.9 | Conservation et charge élémentaire | 23 |
| 2.2.10 | La loi de Coulomb | 23 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.3 | Le champ électrique | 24 |
| 2.3.1 | La loi de Coulomb | 24 |
| 2.3.2 | La notion de champ | 25 |
| 2.3.3 | Définition | 26 |
| 2.3.4 | Corollaires | 27 |
| 2.3.5 | La cage de Faraday | 28 |
| 2.3.6 | Lignes de champ | 28 |
| 2.3.7 | La notion de potentiel | 28 |
| 3 | Électrocinétique | 31 |
| 3.1 | Circuit et courant | 31 |
| 3.2 | Résistance et loi d'Ohm | 31 |
| 3.3 | Sécurité électrique | 33 |
| 3.3.1 | Introduction | 33 |
| 3.3.2 | L'électricité et l'homme | 34 |
| | Facteurs importants | 35 |
| | Symptômes | 35 |
| | Traitements | 35 |
| 3.3.3 | Les mesures de sécurité | 35 |
| | Le réseau électrique | 35 |
| | Pour les bâtiments | 36 |
| | Pour l'homme | 37 |
| 3.4 | Énergie et puissance électrique | 39 |
| 3.5 | Accumulateurs | 40 |
| 3.5.1 | Équations | 40 |
| 3.5.2 | Types d'accumulateurs | 41 |
| 3.6 | Circuits électriques : les multiprises | 42 |
| 3.6.1 | Circuit série | 42 |
| 3.6.2 | Circuit parallèle | 42 |
| 4 | Magnétisme | 47 |
| 4.1 | Introduction | 47 |
| 4.2 | Le champ magnétique | 47 |
| 4.2.1 | Définitions | 47 |
| 4.2.2 | Le champ magnétique terrestre | 48 |
| 4.2.3 | L'expérience d'Ersted | 49 |
| 4.2.4 | Le magnétisme dans la matière | 51 |
| 4.2.5 | Application | 53 |
| 4.3 | La loi de Laplace | 53 |
| 4.3.1 | Définition | 53 |
| 4.3.2 | Applications | 53 |
| | Galvanomètre | 55 |
| | Moteur électrique | 55 |
| 4.4 | La loi de Lorentz | 56 |
| 4.4.1 | Définition | 56 |
| 4.4.2 | Applications | 57 |

| | |
|---|-----------|
| Télévision | 57 |
| Accélérateur de particules : le cyclotron | 58 |
| Spectrographe de masse | 59 |
| 5 Électromagnétisme | 61 |
| 5.1 Nature de la lumière | 61 |
| 5.2 Applications | 62 |
| A Unités internationales | 69 |
| A.1 Introduction | 69 |
| A.2 Les unités choisies | 69 |
| A.3 Exemple | 70 |
| A.4 Conversions | 70 |
| A.5 Multiples et sous-multiples | 70 |
| A.6 Notation scientifique | 70 |
| A.7 Valeurs importantes | 71 |
| B Petite histoire de l'électricité | 73 |
| B.1 Introduction | 73 |
| B.2 Le galvanisme | 73 |
| B.3 Frankenstein | 75 |
| B.4 La pile de Volta | 76 |
| B.5 Courant et tension : Ampère | 78 |
| B.6 Ohm et la notion de résistance | 81 |
| B.7 Conclusion | 81 |
| C La pile électrique | 83 |
| D La notion de tension | 87 |
| D.1 Analogie gravitationnelle | 87 |
| D.2 Tension et potentiel électrique | 87 |
| E Circuits en série et en parallèle | 89 |
| E.1 Deux résistances en série | 89 |
| E.2 Deux résistances en parallèles | 89 |
| E.3 Circuit quelconque | 90 |
| F Vitesse des électrons dans un fil conducteur | 91 |
| F.1 Ordre de grandeur | 91 |
| F.2 Modélisation | 91 |
| G Ligne à haute tension | 93 |
| H Le cyclotron en équations | 97 |

| | |
|--|-----------|
| I Exercices | 99 |
| I.1 Problèmes | 99 |
| I.1.1 Relatifs à la loi de Coulomb | 99 |
| I.1.2 Relatifs au champ électrique | 100 |
| I.1.3 Relatifs à la sécurité électrique | 100 |
| I.1.4 Relatifs aux loi d'Ohm et de Pouillet, à la puissance et à l'énergie | 101 |
| I.1.5 Relatifs au magnétisme | 102 |
| I.2 Solutions | 104 |

Liste des figures

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | L'électroscope et le bâton chargé. | 19 |
| 2.2 | Une "gélule" reliée à deux électroscopes. | 20 |
| 2.3 | La machine de Van der Graaff | 21 |
| 2.4 | Les picants d'un oursin | 21 |
| 2.5 | La machine de Wimshurst | 22 |
| 2.6 | Éclair | 22 |
| 2.7 | Les trajets de la foudre | 22 |
| 2.8 | Le précurseur | 23 |
| 2.9 | La balance de Coulomb | 24 |
| 2.10 | La force de Coulomb | 24 |
| 2.11 | En terme de force | 26 |
| 2.12 | En terme de champ électrique | 26 |
| 2.13 | Champ électrique d'une charge ponctuelle ou sphérique | 27 |
| 2.14 | Le champ et la force | 27 |
| 2.15 | Lignes de champ charge positive | 28 |
| 2.16 | Lignes de champ dans la semoule | 29 |
| 2.17 | Résumé d'électrostatique | 30 |
| | | |
| 3.1 | Loi de Pouillet | 33 |
| 3.2 | Danger et tension | 34 |
| 3.3 | Schéma de principe d'une installation électrique. | 36 |
| 3.4 | Disjoncteurs | 37 |
| 3.5 | Prises avec ligne de terre | 37 |
| 3.6 | Disjoncteur à courant de défaut (FI)s | 38 |
| 3.7 | Tâteur | 38 |
| 3.8 | Accumulateurs | 41 |
| 3.9 | Circuit électrique | 42 |
| 3.10 | Circuit série | 43 |
| 3.11 | Circuit parallèle | 43 |
| 3.12 | Une multiprise | 43 |
| 3.13 | Multiprise | 43 |

| | | |
|------|---|-----|
| 3.14 | Résumé d'électrocinétique | 45 |
| 4.1 | La magnétosphère | 48 |
| 4.2 | Lignes de champ aimant droit | 48 |
| 4.3 | Anomalies magnétique | 49 |
| 4.4 | Dérive des continents | 50 |
| 4.5 | Ørsted et la boussole | 50 |
| 4.6 | Ørsted et la déviation du fil | 50 |
| 4.7 | Aimant en U | 50 |
| 4.8 | Champ magnétique produit par un fil droit | 51 |
| 4.9 | Champ magnétique produit par une boucle de courant (ou spire) | 51 |
| 4.10 | Champ magnétique produit par un solénoïde | 51 |
| 4.11 | La loi de Laplace | 54 |
| 4.12 | Un cadre dans un champ magnétique | 54 |
| 4.13 | Un galvanomètre | 55 |
| 4.14 | Moteurs électriques | 55 |
| 4.15 | Les bobines de Helmholtz | 57 |
| 4.16 | Le canon à électron | 57 |
| 4.17 | Principe de fonctionnement du cyclotron | 58 |
| 4.18 | Le cyclotron des Arts et Métiers | 59 |
| 4.19 | Les deux D d'un cyclotron | 59 |
| 4.20 | Spectrographe de masse | 59 |
| 4.21 | Résumé de magnétisme | 60 |
| 5.1 | Onde électromagnétique | 61 |
| 5.2 | Le spectre des ondes électromagnétiques | 62 |
| B.1 | Expériences de Galvani | 75 |
| B.2 | Propagation par influence. | 79 |
| C.1 | Principe de fonctionnement de la pile de Daniell | 85 |
| C.2 | Pile sèche | 86 |
| D.1 | Énergie potentielle et potentiel électrique | 88 |
| E.1 | Circuit de deux résistances en série | 89 |
| E.2 | Circuit de deux résistances en parallèle | 90 |
| F.1 | Vitesses de propagation | 91 |
| G.1 | Ligne à haute tension | 93 |
| G.2 | Isolateur | 94 |
| I.1 | Une batterie | 102 |
| I.2 | Champ à 33 cm | 107 |
| I.3 | Force et champ | 107 |
| I.4 | Champ entre deux charges | 107 |

I.5 Proton en suspension 108
I.6 Proton accéléré 108
I.7 Une charge et l'autre 109
I.8 Champ produit par trois charges 109
I.9 Fil droit orienté est-ouest 115
I.10 Fils sur des pylônes 115
I.11 Deux fils verticaux 116
I.12 Un fil et une spire 116
I.13 Un avion chargé (3 dim) 116
I.14 Éclair sur une voiture 117
I.15 Déviation magnétique 117
I.16 Déviation magnétique sur un écran 118

Liste des tableaux

| | | |
|-----|--|-----|
| 3.1 | Symptômes d'électrocution | 35 |
| 5.1 | Le spectre des applications électromagnétiques | 64 |
| A.1 | unités SI | 69 |
| A.2 | Conversions | 70 |
| A.3 | Multiples | 70 |
| A.4 | Valeurs importantes | 71 |
| I.1 | Résistances diverses | 101 |
| I.2 | Puissances diverses | 101 |
| I.3 | Résistances diverses | 110 |
| I.4 | Courants divers | 111 |
| I.5 | Puissances diverses | 111 |

Chapitre 1

Introduction

1.1 Introduction

La physique moderne en tant que science mathématique commence, dans son principe, avec Galilée et, dans les faits, avec Newton. En partie à partir d'éléments déjà existants mais épars (la notion de quantité de mouvement, par exemple, que l'on doit à Descartes (1644 "Principes II"), philosophe et inventeur des lunettes) et en partie à partir de ses propres constructions (le calcul différentiel et intégral, inventé simultanément par Leibnitz), Newton élabore, la première théorie physique mathématisée (1687 "Principes mathématiques de la philosophie naturelle" ou "Principia mathematica ..."). Cette théorie est si puissante qu'elle va être à la base de toutes les recherches menées en physique jusqu'au XIX^e siècle.

Néanmoins, après Newton, la physique va évoluer. Si la conception corpusculaire de la lumière de Newton (1672 "Philosophical Transactions" et 1704 "Optique") masque pendant près d'un siècle la conception ondulatoire de Huygens (1690 "Traité de la lumière"), elle va être discréditée par les travaux de deux chercheurs : Young (travaux effectués entre 1802 et 1807) et Fresnel (travaux effectués entre 1815 et 1819). Ceux-ci établissent que la théorie ondulatoire de la lumière rend compte aussi bien que sa concurrente de tous les phénomènes optiques jusqu'alors observés. Les deux théories cohabitent jusqu'en 1849 où Foucault et Fizeau réalisent une expérience sur la vitesse de la lumière dans l'eau qui met en défaut la théorie de Newton. Par la suite (à partir de

1905), avec Einstein, la conception corpusculaire va reprendre vie pour finir par coexister, de nos jours encore, avec la conception ondulatoire sous la forme d'une compréhension simultanément ondulatoire et corpusculaire de la lumière.

Elle évolue aussi considérablement durant cette période dans la connaissance des phénomènes électriques et magnétiques. Cette évolution, dont nous allons reparler ci-dessous, se fait tout naturellement à partir de la conception corpusculaire (pour ne pas dire atomiste) de la matière de Newton et par la recherche de lois d'interaction (loi de force) entre les charges, les courants et les aimants de la même forme inversement proportionnelle au carré de la distance que la loi de la gravitation universelle (de Newton). Les théories sur l'électricité et le magnétisme vont cependant nettement diverger du modèle mécanique (modèle basé sur la théorie mécanique de Newton) en raison de l'impossibilité de préserver en magnétisme la loi de l'action et de la réaction (troisième loi de Newton). Ces théories vont mener à une formulation très complète des lois régissant les phénomènes électriques et magnétiques, formulation connue sous le nom de théorie électromagnétique de Maxwell (1864). Celle-ci utilise des concepts inconnus de Newton, comme la notion de champ, et mène à une vision ondulatoire de la propagation des phénomènes électromagnétiques (comme les phénomènes lumineux) en totale contradiction avec les présupposés mécanistes newtoniens.

A l'aube du XX^e siècle, les phénomènes mécaniques sont donc décrits par la théorie de Newton (ou plutôt par une théorie de Newton modernisée mais admettant les mêmes hypothèses : la théorie de Lagrange et Hamilton. Notons que celle-ci dégage un nouveau concept dont le rôle sera crucial durant le XX^e siècle : celui d'énergie) et les phénomènes électromagnétiques par la théorie de Maxwell.

Le XX^e siècle quant à lui sera une ère nouvelle. Avec Einstein, c'est la reformulation de la loi de la gravitation en terme de champ (de gravitation) menant à une nouvelle théorie de la mécanique. Avec Bohr (et beaucoup d'autres), c'est une fusion des concepts d'onde et de particule pour décrire la matière dans l'infiniment petit : c'est la physique quantique.

1.2 Rappels

1.2.1 Les lois de Newton

Il n'est pas inutile de rappeler les trois lois fondamentales découvertes par Newton. Elles permettent de décrire, à elles seules, l'état et l'évolution de tout système mécanique (c'est-à-dire de tout corps matériel se déplaçant à des vitesses petites par rapport à celle de la lumière).

Première loi (loi d'inertie)

« Tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme, sauf si des forces imprimées le contraignent d'en changer. »

Deuxième loi (principe fondamental)

La somme des forces extérieures qui s'exercent sur un système est égale au produit de la masse par l'accélération.

Troisième loi (action et réaction)

« La réaction est toujours contraire et égale à l'action »

ou encore :

« Les actions que deux corps exercent l'un sur l'autre sont toujours égales et dirigées en sens contraire. »

1.2.2 La loi de la gravitation universelle

Il faut, d'autre part, rappeler la loi de la gravitation universelle :

$$\vec{F} = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^3} \cdot \vec{r}$$

ou scalairement :

$$F = G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

avec :

- \vec{F} : force gravitationnelle entre m et M ,
- G : constante de la gravitation universelle et
- \vec{r} : distance entre les deux masses.

1.2.3 Conclusion

A partir de ces trois lois fondamentales et de la loi de la gravitation universelle, la grande majorité des phénomènes physiques connus au début du XVIII^e siècle pouvaient être décrits. Cela signifie que les lois connues à cette époque pouvaient être déduites des lois de Newton et on peut donc dire, en substance, qu'elles étaient toute la physique que l'on connaissait alors.

Électrostatique

2.1 Introduction

L'électrostatique est la partie de l'électricité qui traite des phénomènes où des charges immobiles agissent. Lorsque les charges sont en mouvement, on parle soit d'électrocinétique (voir 3) ou d'électromagnétisme (voir 4).

2.2 La loi de Coulomb

2.2.1 La charge électrique

Le modèle que la science a retenu pour expliquer les interactions électriques est celui de Benjamin Franklin. Celui-ci avait une théorie de la vie très particulière. Il disait que la vie est toujours faite d'événements positifs et négatifs. Il avait remarqué que les événements positifs, comme les événements négatifs d'ailleurs, ne se suivent généralement pas. Tout se passe comme s'ils se repoussaient. Ainsi après tout événement négatif (respectivement positif) vient inévitablement un événement positif (respectivement négatif). Par ailleurs, mais peut-être vous y attendiez-vous, la somme des événements positifs et négatifs sur une vie entière est globalement neutre.

Poursuivant cette théorie, Franklin distingue, au sein de la matière, des particules positives et négatives. Les particules de même nature (positives ou négatives) se repoussent entre elles. Par contre, les particules de natures différentes s'attirent. Ainsi, une

particule positive attire une particule négative. Alors que, par exemple, deux particules négatives se repoussent. Par ailleurs, une matière dans laquelle se trouvent autant de particules négatives que de positives est dite neutre.

Cette théorie est à la base de la compréhension actuelle des interactions électriques.

2.2.2 Le pendule électrique

Description de l'expérience

On frotte une tige en plastique (du PVC) avec une peau de chat. Puis on approche cette tige d'une petite boule en aluminium suspendue à un fil de polyester.

Dans un premier temps, la petite boule est attirée par la tige. Puis, un bref instant, elle se colle à elle. Enfin, elle est violemment repoussée.

Un autre comportement peut avoir lieu. D'abord une attraction et comme précédemment la boule touche la tige. Mais ensuite elle y reste collée.

Explications

L'attraction s'explique par une polarisation de la boule (préalablement neutre). Les charges positives et négatives, présentes en même quantité dans la boule neutre, se séparent. Si, par exemple, la tige est chargée négativement, les charges positives de la boule sont attirées et se rapprochent de la tige alors que les négatives s'en éloignent. On dit alors que la boule est

Benjamin Franklin (1706-1790)

On le connaît généralement pour l'invention du paratonnerre, mais ce fut aussi un philosophe. Il fut l'un des premiers à comprendre l'existence de deux électricités différentes : positive et négative.

“Delà quelques termes nouveaux se sont introduits parmi nous. Nous disons que B (...) est électrisé positivement, et A négativement ; ou plutôt B, est électrisé plus et A l'est moins, [...] Pour électriser en plus ou en moins, il faut seulement savoir que les parties du tube ou du globe qui sont frottées, attirent dans l'instant du frottement le feu électrique, et l'enlèvent par conséquent à la chose frottante. Les mêmes parties aussitôt que le frottement cesse, sont disposées à donner le feu qu'elles ont reçu à tout corps qui en a moins.”

(Franklin, 2006, p. 134.)



Portrait de Benjamin Franklin tiré de Wikipedia¹

Cerf-volant, éclair et paratonnerre sont associés à Benjamin Franklin, non sans raison :

“Les expériences faites sur l'électricité suggérèrent bientôt aux philosophes l'idée que la matière de la foudre ne différait pas de la matière électrique. [...] Si la communication se fait au travers de l'air sans aucun conducteur, on voit une lumière brillante entre les deux corps, et on entend un bruit. [...] Si l'on place une verge de fer à l'extérieur d'un bâtiment, sans interruption depuis son sommet jusque dans la terre humide, [...] elle recevra la foudre à son extrémité supérieure, en l'attirant de manière à l'empêcher de frapper aucun autre endroit”.

(Franklin, 2006, p. 201 et 203.)

polarisée (elle contient deux pôles : positif et négatif). Or, même si les deux groupes de charges contiennent le même nombre de particules (donc la même charge, puisque la boule est globalement toujours neutre), ceux-ci ne sont pas attirés de la même manière par la tige. En effet, l'expérience montrant une attraction, on ne peut que l'expliquer par la présence d'une force d'attraction (entre les charges négatives de la tige et les positives de la boule) plus forte que celle de répulsion (entre les charges négatives de la tige et les négatives de la boule). Comme les deux groupes de charges contiennent le même nombre de charges, donc la même charge (au signe près), on ne peut attribuer la différence d'intensité de la force qu'à la distance entre les charges. En effet, les charges positives de la

boule sont plus près des négatives de la tige que ne le sont les charges négatives. On doit aussi supposer que le signe des charges n'intervient pas dans l'intensité de la force électrique. Celui-ci ne sera responsable que du caractère attractif ou répulsif de celle-ci.

Ainsi, en approchant la tige de la boule, la polarisation induit une différence de distance entre les types de charges, ce qui produit une attraction plus forte que la répulsion. Cette attraction se produit tant qu'on approche la tige. Si on la retire, la polarisation des charges diminue en même temps que la force d'attraction, pour s'annuler quand la polarisation cesse et que les charges se retrouvent totalement mélangées.

La boule attirée par la tige peut venir la toucher.

Alors deux phénomènes peuvent se produire.

Si la tige est fortement chargée, il y a dans le bâton beaucoup de charges négatives sur le lieu du contact. Plus précisément, il y en a assez pour annuler les charges positives de la boule. La polarisation disparaît puisqu'il n'y a alors plus en présence que des charges négatives (dans la boule et dans le bâton). Une violente répulsion s'ensuit.

Si la tige est faiblement chargée, il y a dans le bâton peu de charges négatives sur le lieu du contact. Il peut ne pas y en avoir assez pour annuler les charges positives de la boule. Ainsi, il peut rester un nombre non négligeable de charges positives dans la boule, encore attirées par les négatives de la tige. La différence de distance impliquant toujours une force d'attraction plus importante que celle de répulsion, la boule reste collée au bâton.

2.2.3 Les isolants

Le second comportement de l'expérience du pendule précédemment décrite (voir 2.2.2) est intéressant à un autre titre. En effet, il n'est possible que parce que les charges du bâton ne peuvent se déplacer sur celui-ci. Sinon, des charges négatives éloignées du point de contact avec la boule viendraient annuler les charges positives et, dans tout les cas, une violente répulsion se produirait. Cela marque le fait que le bâton en plastique ne permet pas aux charges de se déplacer. On le dit isolant.

Un isolant est donc une matière qui ne permet pas aux charges de se déplacer. Par opposition, un conducteur permet aux charges de se déplacer librement. Les conducteurs parfaits, qui permettent aux charges de se déplacer sans aucune contrainte, sont appelés supraconducteurs. Pour les conducteurs qui ne sont pas parfaits, on peut définir une grandeur qui représente la résistance de la matière au passage des charges (voir 3.2).

2.2.4 L'électroscope

Description de l'expérience

Un électroscope est un appareil entièrement métallique supportant une aiguille pivotant sur un axe et

FIGURE 2.1 – L'électroscope et le bâton chargé.



surmonté d'un plateau circulaire. Le tout est isolé du sol par un morceau de plastique (voir figure 2.1).

Lorsqu'on approche du plateau un bâton chargé, l'aiguille monte. Si on éloigne le bâton, elle redescend.

Si on touche le plateau avec le bâton, l'aiguille reste écartée du support.

Si on touche plusieurs fois le plateau avec un bâton chargé, l'aiguille monte progressivement de plus en plus haut.

Si, après avoir touché l'électroscope avec un bâton en plastique chargé et que l'aiguille soit montée, on le touche à nouveau avec un bâton chargé, mais en verre cette fois-ci, l'aiguille redescend.

Explications

En approchant un bâton chargé négativement, on polarise l'électroscope (au préalable neutre). Le plateau se charge positivement (par influence attractive) et la tige de soutien de même que l'aiguille qui lui est attachée se chargent négativement et ainsi se repoussent faisant monter l'aiguille. Lorsqu'on retire le bâton, l'électroscope se dépoliarise et l'aiguille redescend.

Si on touche le plateau avec le bâton, on permet aux charges de passer sur l'électroscope et ainsi de le charger uniformément. Le plateau, le montant et l'ai-

FIGURE 2.2 – Une “gélule” reliée à deux électroscopes.



guille ont donc la même charge acquise par contact. Cette charge reste sur l'électroscope et peut augmenter si on amène des charges avec un autre bâton chargé.

Si, par contre, on amène des charges de signe opposé en touchant avec un bâton chargé positivement en verre par exemple, on “annule” les charges négatives déposées précédemment et l'aiguille redescend.

2.2.5 Charge par influence

Description de l'expérience

On approche un bâton chargé négativement sur le côté d'un conducteur métallique de la forme d'une grosse gélule (voir figure 2.2). Les deux extrémités de celui-ci sont chacune reliées à un électroscope différent. Quand le bâton est assez près du conducteur, sans le toucher, on sépare la gélule en deux parties.

Pendant l'approche du bâton, on constate que les deux électroscopes réagissent simultanément. Si on retire le bâton, l'influence cesse. Après séparation des deux parties de la gélule sous l'influence du bâton, on constate en retirant ce dernier que la charge des électroscopes perdure. Si on approche alors à nouveau le bâton, l'un des électroscope voit sa charge diminuer et l'autre augmenter. Si on reforme la gélule par contact, la charge des deux électroscopes disparaît.

Explications

A l'approche du bâton, la gélule se polarise par influence. L'un de ses côté est donc chargé positive-

ment (celui qui se trouve le plus près du bâton) et l'autre négativement. En séparant la gélule en deux parties, on supprime donc la possibilité aux charges de reprendre leur position initiale. Chaque partie de la gélule est ainsi chargée différemment. Lorsqu'on approche le bâton chargé négativement de la demi gélule chargée positivement, on repousse les charges négatives vers l'électroscope et ainsi diminue sa charge positive. Son aiguille descend. Par contre, si on approche le bâton négatif de l'autre demi gélule, on repousse encore les charges négatives vers l'électroscope. Comme celui-ci est chargé négativement, son aiguille monte, traduisant une augmentation de la charge négative au niveau de l'électroscope. Finalement, si on reforme la gélule, les charges peuvent alors reprendre leur place pour neutraliser la charge totale et les deux électroscopes se déchargent.

2.2.6 La machine de Van de Graaff

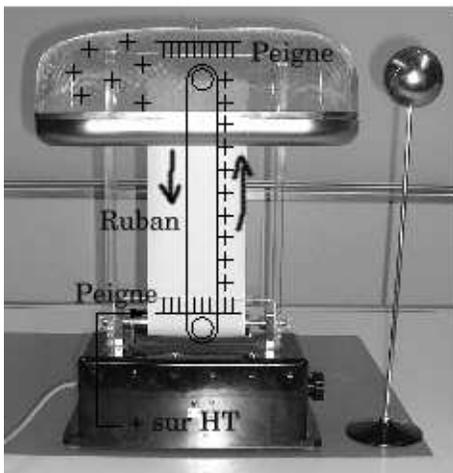
Description de l'expérience

A l'aide d'un ruban soumis à un frottement, on amène des charges sur une boîte métallique isolée du sol par deux supports en plastique (voir figure 2.3). Le fait que le ruban soit entraîné par un moteur et que le frottement soit continu permet d'amener beaucoup de charges sur la boîte. On peut mettre au contact de la boîte une personne par ailleurs isolée du sol. Les cheveux de celle-ci s'écartent alors les uns des autres à la manière des piquants d'un oursin.

Explications

Un générateur haute tension (voir plus loin) amène des charges positives sur un peigne placé à proximité d'un ruban isolant en rotation autour de deux axes. Ce peigne transfère des charges positives au ruban. Ces charges sont alors amenées, par la rotation du ruban, à l'intérieur d'une cage métallique où, par influence, elles attirent les charges négatives de celle-ci vers l'intérieur et repoussent les positives à l'extérieur. On obtient donc une cage métallique chargée positivement à sa surface. En effet, la partie intérieure est déchargée par un autre peigne qui part de celle-ci et va récolter les charges positives à proximité du

FIGURE 2.3 – La machine de Van der Graaff



ruban. Ainsi déchargé, le ruban retourne alors vers le premier peigne et le cycle recommence. La charge de la cage augmente donc progressivement jusqu'au moment où elle perd autant de charges dans l'air qu'elle n'en "reçoit" du ruban.

On peut alors faire toucher la cage par une personne isolée du sol. Les charges se répartissent ainsi dans tout le corps de la personne. Elles sont de même signe et donc se repoussent. Ainsi chargés de manière identique, les cheveux se repoussent les uns les autres et la répartition qui permet à chaque charge d'être la plus éloignée possible des autres est celle qui est semblable à la position des piquants d'un oursin (voir figure 2.4).

2.2.7 La machine de Wimshurst

C'est l'une des machines les plus connues (voir figure 2.5). Son fonctionnement est complexe. On ne peut l'aborder dans toute son étendue ici. Disons en substance qu'un frottement, puis une séparation des charges sur deux disques tournant en sens inverse, permet d'envoyer des charges positives et négatives dans deux bouteilles de Leyde (c'est-à-dire des condensateurs, des accumulateurs de charges) différentes. Puis ces charges sont amenées à l'extrémité

FIGURE 2.4 – Les picants d'un oursin ...



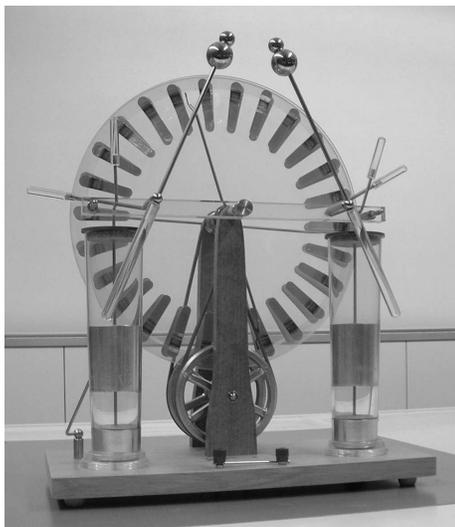
de deux tiges métalliques que l'on rapproche progressivement. Il se produit alors des décharges se manifestant par de petits éclairs. On peut montrer qu'un transfert de matière a lieu en plaçant une feuille de papier sur le chemin de la décharge. La feuille est alors percée de petits trous traduisant le passage des électrons.

2.2.8 La foudre

Manifestement le phénomène est d'origine électrostatique³. La physique du phénomène (encore mal connue) commence à l'intérieur d'un nuage dans lequel les courants ascendants sont importants et où ...

« [...] il se produit une séparation des charges électriques au sein du nuage. Depuis la première théorie, imaginée par Lenard en 1892 pour expliquer ce processus, de nombreuses autres théories ont vu le jour. Il est impossible de les citer toutes, mais aucune ne suffit à elle seule à complètement expliquer les faits observés, et il est très pro-

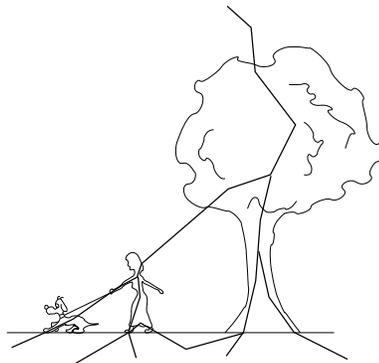
FIGURE 2.5 – La machine de Wimshurst

FIGURE 2.6 – Éclair
US National Oceanic and Atmospheric Administration²

bable que plusieurs mécanismes contribuent simultanément à la formation des charges. C'est, par exemple, la théorie de la séparation par collision de fines précipitation avec capture sélective d'ions, envisagée en 1970 par Sartor. D'autres mécanismes sont la rupture des gouttes d'eau, proposée en 1964 par Mattew et Mason, ou encore l'électrisation due au changement de phase de l'eau, proposée en 1966 par Takahashi.

Ces théories ont cependant toutes un point commun : une fois les charges sépa-

FIGURE 2.7 – Les trajets de la foudre



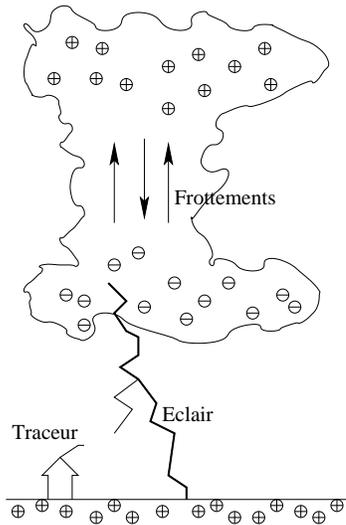
rées, leur transfert [dans le nuage] ne peut avoir lieu que parce que leurs porteurs sont de nature différente. Ceux qui portent des charges positives sont assez légers pour être entraînés par les courants ascendants, ceux qui portent les charges négatives sont assez lourds pour tomber malgré ces courants.

Quoi qu'il en soit, le résultat net de ces processus de séparation est que la partie supérieure des nuages orageux, constitués de cristaux de glace, est chargée positivement, tandis que leur base est chargée négativement. Souvent, un îlot de charges positives est enserré dans la masse négative, sans qu'une explication satisfaisante de sa présence ait encore pu être donnée. Les estimations concernant la charge totale formée montrent qu'elle peut être assez variable : on peut admettre que les charges tant négative que positive, sont comprises entre quelques dizaines et le millier de coulombs, distribuées dans un volume évalué à environ 50 km^3 . »

(Gary, 1994, pp. 52,53.)

La foudre ne fait pas que descendre du nuage, mais monte aussi du sol. De toute aspérité peut en effet monter un précurseur qui peut relier le sol au nuage. Les objets pointus sont des endroits privilégiés pour ces précurseurs, car à proximité des pointes le champ électrique est fort (on parle d'effet de pointe. C'est

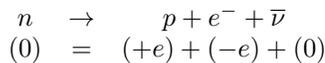
FIGURE 2.8 – Le précurseur
La foudre peut monter à partir d'un traceur.



pourquoi les paratonnerres sont pointus.

2.2.9 Conservation et charge élémentaire

Dans tous les phénomènes décrits ci-dessus, jamais aucune charge ne disparaît. Elles ne font que se déplacer sur différents corps. De manière plus fondamentale, on peut montrer que la charge totale d'un système fermé est conservée. Ainsi dans un processus aussi compliqué qu'une désintégration radioactive où un neutron se transforme en un proton, on a :



Un neutron, de charge 0, se décompose en un proton, de charge $+e$, un électron, de charge $-e$ et un anti-neutrino de charge nulle. Au total, la charge du neutron (nulle) est égale à la charge totale des particules issues de la désintégration (Benson *et al.*, 1999, p. 5.).

La charge est une propriété de la matière, au même titre que sa masse. Ainsi, parler d'une charge pour parler d'une particule chargée, c'est faire le même

raccourci qu'en parlant d'une masse pour parler d'un objet ayant une masse. Toute matière est donc affectée de cette propriété, toute matière a une charge. Dire qu'un objet n'est pas chargé c'est dire en réalité que sa charge est nulle. Aujourd'hui, on sait que le neutron n'a pas de charge et que l'électron et le proton ont la même charge. Celle-ci a longtemps été considérée comme la plus petite charge existante, la charge élémentaire, notée e . Par rapport à la définition de l'unité de charge du système international : le coulomb, noté C, on a que :

$$e = q_{proton} = -q_{electron} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

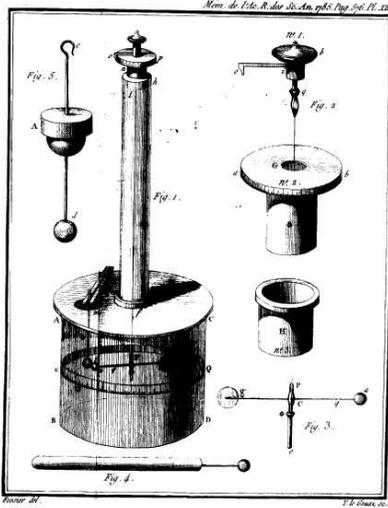
De nos jours, on sait que les quarks, éléments composants les protons et les neutrons, ont une charge inférieure à la charge élémentaire. Cependant, comme jusqu'à présent on n'a jamais pu isoler un quark, on peut dire que la charge élémentaire est la plus petite charge d'une particule isolée. Mais cet état de fait peut changer à l'avenir.

2.2.10 La loi de Coulomb

La loi de Coulomb est une loi de force. Elle établit une relation de force entre deux charges par l'intermédiaire de la distance. Nous avons vu au paragraphe 2.2.2 que l'attraction d'un pendule conducteur neutre par une tige isolante chargée s'explique par le fait qu'à l'intérieur du pendule se crée une polarisation des charges impliquant que chaque type de charge se trouve à une distance différente de la tige. La constatation de l'attraction du pendule oblige alors à supposer une force fonction de la distance. Plus même, cette force doit être inversement proportionnelle à une fonction de la distance pour qu'il y ait attraction.

Coulomb a étudié cette force dans le détail. Pour cela, il a mis au point une balance (voir figure 2.9) permettant de mesurer la force exercée par une charge sur une autre au moyen d'un petit pendule de torsion, une tige horizontale isolante munie à chacune de ses extrémités d'une petite boule métallique chargée et attachée en son milieu par un fin fil de suspension vertical. A l'approche d'une charge extérieure, ce pendule tournait d'un angle déterminé en ramenant

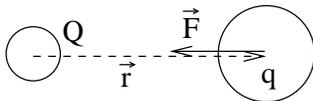
FIGURE 2.9 – La balance de Coulomb
Mémoire sur l'électricité et le magnétisme, 1785, Coulomb.⁴



le pendule dans sa position originale par torsion du fil vertical. Connaissant la force nécessaire pour tordre ce fil d'un tel angle, il déduisit l'expression de la force électrique en fonction des charges en présence et de la distance qui les séparait.

L'expression de la force qu'il découvrit⁶ alors est la suivante :

FIGURE 2.10 – La force de Coulomb



$$\vec{F} = k \cdot \frac{q \cdot Q}{r^2} \cdot \vec{r}$$

Où \vec{F} est la force qui s'exerce entre les deux particules chargées ; q et Q sont les charges de ces deux particules ; k est une constante liée en première analyse à la cohérence des unités de l'équation et vaut dans le système international :

$$k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

enfin, \vec{r} est le vecteur correspondant à la distance qui lie les deux charges.

Remarquons d'emblée que cette force s'exprime en grandeur par :

$$F = k \cdot \frac{q \cdot Q}{r^2} \quad (2.1)$$

On constate sur cette expression la dépendance inversement proportionnelle au carré de la distance de la force. Cette dépendance n'apparaît pas dans l'expression vectorielle car on utilise le vecteur \vec{r} pour indiquer que la force a pour direction la droite qui lie les deux charges.

On doit aussi faire remarquer que si la charge q exerce une force telle que décrite précédemment sur Q , inversement, en raison de la troisième loi de Newton (action = réaction), Q exerce la même force en grandeur, mais dans le sens opposé sur q .

2.3 Le champ électrique

2.3.1 La loi de Coulomb

L'analogie formelle entre la loi de la gravitation universelle et la loi de Coulomb est manifeste. En 1785, date de la publication des deux premiers mémoires de Coulomb sur la force électrique, cette analogie fait triompher le newtonianisme. Pourquoi ? Comprendons bien que la loi de la gravitation universelle traduit un type d'interaction (entre deux masses m et M) aux caractéristiques particulières. C'est une interaction :

à distance, instantanée, s'exerçant le long de la droite joignant deux corps ponctuels ou sphériques, proportionnelle au produit des masses de ces corps et inversement proportionnelle à leur distance au carré.

Or, tout en décrivant un domaine de la physique radicalement différent de la gravitation, la loi de Coulomb conserve les mêmes caractéristiques que celle-ci. L'analogie est si forte que les quantités q et Q sont

Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806)

Ingénieur de formation, il est un très grand physicien. On lui doit la loi du frottement sec, mais surtout la loi et la balance qui portent son nom.

“La balance électrique que j’ai présentée à l’Académie, au mois de juin 1785, mesurant avec exactitude et d’une manière simple et directe la répulsion de deux balles qui ont une électricité de même nature, il a été facile de prouver, en se servant de cette balance, que l’action répulsive de deux balles électrisées de la même nature d’électricité et placées à différentes distances était très exactement en raison inverse du carré des distances”.

(Coulomb, 1884, p. 116.)

Portrait de Charles Coulomb tiré de Wikipedia⁵



traduites en termes de corpuscules, ce que rien n’autorisait alors à faire (rappelons que la découverte de l’électron date de 1891 avec Stoney, que la première théorie de l’électron date de 1895 avec Lorentz, que l’électron ne fut abordé par Bohr au sein d’une théorie atomique qu’en 1913 et que le proton ne fut découvert qu’en 1919). Ainsi a-t-on considéré la loi de Coulomb comme une confirmation de la théorie newtonienne en raison de son identité formelle avec la loi de la gravitation. Ainsi a-t-on aussi, par la même occasion, entériné les positions corpusculaires de Newton en ce qui concerne la lumière.

Cette identité formelle des lois décrivant des domaines différents de la physique influença donc fortement les physiciens.

2.3.2 La notion de champ

C’est Faraday qui en 1852 “découvre” la notion de champ. Il bouscule le “dogme de l’universalité du concept de force, pensé sur le mode de l’attraction gravitationnelle” (Balibar, 1992, p. 30.).

« Avec la théorie de Maxwell [et Faraday] de l’électricité, écrit Einstein, la théorie du mouvement de Newton, conçue comme programme valable pour l’ensemble de la phy-

sique théorique, a connu sa première mise en question. Il s’avéra que les interactions entre corps électriques et magnétiques ne sont pas dues à des forces s’exerçant à distance et à effet instantané, mais à des processus qui se propagent dans l’espace et à une vitesse finie. D’où l’apparition, dans la conception de Faraday, à côté du point matériel et de son mouvement, d’une nouvelle sorte de chose physique réelle : le champ ».

(Balibar, 1992, p. 30.)

De plus, le concept de force, pensé sur le modèle de l’attraction universelle, c’est-à-dire en termes d’action instantanée, à distance et selon la ligne qui joint deux corps, ne permet pas de décrire des forces comme la force magnétique “qui, au lieu d’agir en ligne droite, font subir une rotation (et non un déplacement en ligne droite le long de la direction de la force) aux corps qui y sont soumis” (Balibar, 1992, p. 34.). Le concept de champ permet donc :

- premièrement, de repenser l’action à distance par l’intermédiaire d’une grandeur localisée en chaque point de l’espace. Cette grandeur n’étant pas directement reliée aux corps qui la produisent, mais aux autres grandeurs de son voisinage immédiat (par l’intermédiaire de ce

qu'on appelle une équation aux dérivées partielles), elle peut alors être considérée comme une grandeur indépendante des corps, évoluant sous l'effet d'actions de proximité.

Feynman (prix Nobel de physique en 1965) parle ainsi de la notion de champ :

« un champ réel est une fonction mathématique que nous utilisons pour éviter d'utiliser la notion d'action à distance. Si nous avons une particule chargée au point P, elle est affectée par les autres charges localisées à une certaine distance de P. Un moyen de décrire l'interaction est de dire que les autres charges créent certaines conditions - quoi que cela puisse être - au voisinage de P. Si nous connaissons ces conditions, que nous décrivons par la donnée des champs électriques et magnétiques, nous pouvons déterminer complètement le comportement de la particule - sans autre référence à la façon dont ces conditions ont été créées.

En d'autres termes, si ces autres charges ont été modifiées d'une certaine façon, mais si les conditions en P décrites par les champs électriques et magnétiques en P demeurent les mêmes, alors le mouvement de la charge sera aussi le même. Un champ "réel" est un ensemble de nombres que nous caractérisons de telle sorte que ce qui se passe *en un point* dépend seulement des nombres *en ce point* ».

(Feynman, 1979, p. 258.)

— et deuxièmement une généralisation du concept de force pour permettre une vision unifiée de l'électricité et du magnétisme.

Graphiquement on a alors :

FIGURE 2.11 – En terme de force



L'expression en terme de force \vec{F} est alors :

$$\vec{F} = k \cdot \frac{q \cdot Q}{r^3} \cdot \vec{r}$$

La force sur q est directement déterminée par Q.

FIGURE 2.12 – En terme de champ électrique



L'expression en terme de champ électrique \vec{E} est alors :

$$\boxed{\vec{F} = q \cdot \vec{E}} \quad (2.2)$$

La force est déterminée par le champ électrique (qui, après son émission par Q, ne dépend plus de cette charge).

2.3.3 Définition

Ainsi, puisqu'une charge Q exerce une force sur n'importe quelle autre charge, la charge Q modifie les propriétés de l'espace et y crée un champ électrique. La force exercée sur une charge q par la charge Q dépend, d'après la loi de Coulomb, de la distance séparant les charges et de la valeur des deux charges. Par contre le champ électrique ne doit pas dépendre de la charge q étant donné que ce champ est une propriété de l'espace créée par la charge Q uniquement. On définit donc le champ électrique \vec{E} dû à la charge Q en un point comme égal à la force que ressentirait une charge q en ce même point divisée par la valeur de q. Cela rend le champ indépendant de q. Ainsi on a :

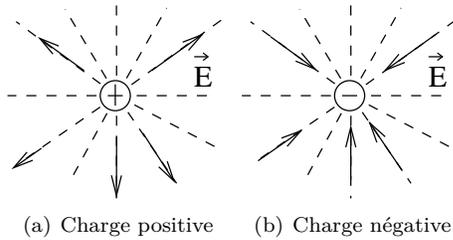


FIGURE 2.13 – Champ électrique d’une charge ponctuelle ou sphérique

$$\boxed{\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}} \quad (2.3)$$

Dans le cas de charges ponctuelles ou sphériques, on a :

$$E = \frac{F}{q} = k \cdot \frac{|Q|}{d^2} \quad (2.4)$$

La valeur absolue de la charge Q est ici utilisée, car le calcul mène à la norme $E = \|\vec{E}\|$ définie positive du vecteur champ électrique.

La représentation spatiale du champ pour une charge ponctuelle ou sphérique positive est donnée à la figure 2.13(a) et pour une charge négative à la figure 2.13(b).

2.3.4 Corollaires

Les unités du champ électrique sont des N/C (newton par coulomb). La définition implique que le champ électrique créé par la charge Q a la même direction que la force électrique dont il est responsable et que son sens est le même que celui de la force exercée sur une charge test q si elle est positive ou l’inverse si elle est négative.

On peut donc avoir les situations présentées à la figure 2.14 (la charge à gauche est celle qui émet le champ et celle de droite celle sur laquelle le champ électrique va exercer une force).

On peut conclure de la présentation des cas de la figure 2.14 que le champ électrique *produit* par une charge positive a un sens “sortant” de la charge positive (figure 2.14(c) et 2.14(d)). Alors que le sens du

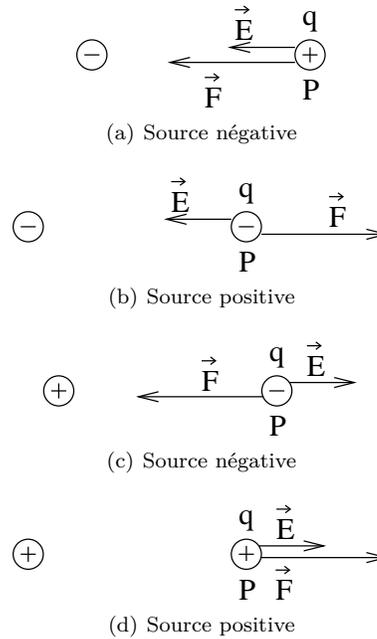


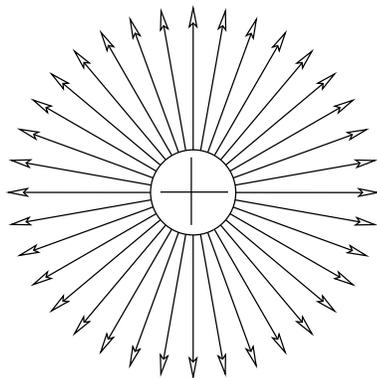
FIGURE 2.14 – Le champ et la force

champ produit par une charge négative “rentre” dans celle-ci (figure 2.14(a) et 2.14(b)). Par ailleurs, l’action du champ sur une charge positive, c’est-à-dire la force qu’il (le champ) exerce sur cette charge, s’exerce dans le même sens que celui du champ (figure 2.14(a) et 2.14(d)). Par contre, l’action du champ sur une charge négative s’exerce elle dans le sens contraire de celui du champ (figure 2.14(b) et 2.14(c)).

Notons encore que le champ électrique est une grandeur vectorielle et que deux champs électriques (ou plus) s’additionnent donc comme des vecteurs. Ainsi, si plusieurs charges créent chacune un champ électrique, alors le champ électrique total en un point de l’espace sera la somme vectorielle des champs créés par chacune des charges (comme pour la force on a donc un principe de superposition des champs).

Il est parfois utile de créer un champ électrique uniforme. Pour cela, il est bien évident qu’il faudra plusieurs charges. On peut démontrer que si on prend deux plans infiniment grands et chargés identiquement l’un positivement et l’autre négativement, alors

FIGURE 2.15 – Lignes de champ pour une charge sphérique positive



le champ électrique entre les deux plans est partout constant (même grandeur, même direction et même sens). Alors qu'en dehors, le champ est nul. Ainsi, en bonne approximation, pour deux plaques finies chargées identiquement mais de manière opposées, de dimensions grandes par rapport à la distance séparant les deux plaques, on peut dire qu'entre celles-ci le champ est vectoriellement constant et qu'à l'extérieur il est à peu près nul.

2.3.5 La cage de Faraday

A l'intérieur d'un conducteur, par répulsion électrostatique, les charges vont se répartir à la surface du conducteur pour être le plus loin les unes des autres. Cela va avoir une conséquence importante pour le champ électrique créé par celles-ci à l'intérieur du conducteur. En effet, on montre théoriquement et expérimentalement qu'à l'intérieur du conducteur le champ électrique est nul. On dit d'un conducteur creux qu'il agit comme une cage de Faraday (en hommage à Faraday qui découvrit l'absence de champ dans une boîte métallique). C'est une propriété qui permet le blindage des appareils électroniques très sensibles aux champs électriques. On applique à l'intérieur de ceux-ci une feuille métallique (donc conductrice) qui réalise ce blindage. Cela explique aussi pourquoi il est parfois difficile de recevoir

la radio à l'intérieur de bâtiments réalisés en béton armé. L'armature fait alors office de cage de Faraday. Cet effet est d'autant plus fort que les stores du bâtiment sont métalliques et fermés.

2.3.6 Lignes de champ

Il est fastidieux de calculer le champ électrique en chaque point de l'espace. Pour cette raison, nous aimerions bien posséder une cartographie du champ électrique qui nous indiquerait la direction, le sens et la grandeur du champ en chaque point. Pour cela nous allons utiliser les lignes de champ, qui sont construites de telle façon qu'elles sont tangentes au champ électrique et dont la densité indique la grandeur relative du champ. Ainsi, lorsque les lignes de champ sont très rapprochées, alors le champ est grand et inversement. Pour mettre en évidence les lignes de champ, on place des charges test (par exemple des grains de semoule sur une fine couche d'huile) et on observe comment ces dernières s'orientent dans l'espace. Pour une charge ponctuelle positive, on obtient la configuration de la figure 2.15 réalisée dans l'huile de ricin avec de la semoule de blé à la figure 2.16.

2.3.7 La notion de potentiel

Le champ électrique (et magnétique) est une grandeur vectorielle. Cela signifie qu'il est univoquement défini par trois chiffres. C'est donc une grandeur complexe. Pour éviter cette complexité, dans le cas où les forces en présence satisfont au théorème de conservation de l'énergie, il est possible de résumer un champ vectoriel (c'est-à-dire un champ de petites flèches dans tout l'espace) par un champ scalaire (c'est-à-dire par la donnée en chaque point de l'espace d'un unique nombre) nommé potentiel (voir annexe D.2).

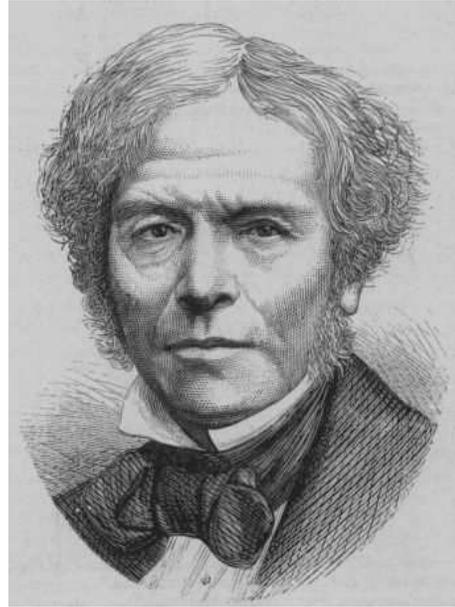
Ainsi le champ vectoriel de gravitation (un ensemble de vecteurs \vec{g} dans tout l'espace, dirigés vers le centre de la Terre) peut-il être représenté par la grandeur $g \cdot h$ (g : accélération terrestre ; h : hauteur) que l'on peut nommer potentiel gravifique. Il existe alors une transformation mathématique (appelée gradient et qui est une dérivée dans l'espace) permettant de retrouver le champ de gravitation à

Michaël Faraday (1791-1867)

On lui doit les notions de lignes de (force) champ magnétique et d'induction magnétique. Le blindage des appareils électroniques contre le champ électrique porte son nom : cage de Faraday. James Clerk Maxwell mathématisa ses travaux pour en faire la grande théorie unifiée de l'électromagnétisme.

“The progress of the electrical researches which I have had the honour to present to the Royal Society, brought me to a point at which it was essential for the further prosecution of my inquiries that no doubt should remain of the identity or distinction of electricities excited by different means. [...] The various phenomena exhibited by electricity may, for the purposes of comparison, be arranged under two heads ; namely, those connected with electricity of tension, and those belonging to electricity in motion. This distinction is taken at present not as philosophical, but merely as convenient. The effect of electricity of tension, at rest, is either attraction or repulsion at sensible distances. The effects of electricity in motion or electrical currents may be considered as [...] Magnetism”.

(Faraday, 1869, p. 1-3.)



Portrait de Michaël Faraday tiré de Wikipedia⁷

FIGURE 2.16 – Lignes de champ pour une charge sphérique positive



semble de vecteurs \vec{E} dans tout l'espace) peut-il être représenté par la grandeur nommée potentiel électrique $E \cdot h$ (E : valeur du champ électrique ; h : distance à un point de référence arbitrairement choisi). La même transformation que décrite précédemment (gradient) permet alors de retrouver le champ électrique à partir de son potentiel.

Bien entendu la signification physique de la notion de potentiel est celle d'une énergie potentielle par unité de masse, pour la gravitation, et par unité de charge, pour l'électrostatique.

partir du potentiel (c'est-à-dire à partir du champ scalaire).

Ainsi aussi, le champ vectoriel électrique (un en-

RÉSUMÉ DES GRANDEURS ET UNITÉS

| Grandeur | Définition | Unité |
|----------------------|----------------|----------------------------|
| Charge | q | C |
| Charge élémentaire | e | $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C |
| Charge du proton | $q_{p^+} = e$ | C |
| Charge de l'électron | $Q_{e^-} = -e$ | C |
| Champ électrique | \vec{E} | N/C |

Appareil d'électrostatique

Électroscope

Machine de Van der Graaff

Machine de Wimshurst

Balance de Coulomb

Loi importante

$$F = k \cdot \frac{q \cdot Q}{r^2} \text{ loi de Coulomb} \quad (2.5)$$

$$E = k \cdot \frac{Q}{r^2} \quad (2.6)$$

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \quad (2.7)$$

Concept important :

Champ électrique : lumière, télévision, radio, radar, téléphone mobile, ...

FIGURE 2.17 – Résumé d'électrostatique

Électrocinétique

Jusqu'à maintenant nous avons parlé de phénomènes électriques mettant en jeu des charges statiques (excepté pour l'éclair orageux où des charges se déplacent). Par la suite, nous allons nous intéresser à des charges en mouvement, à ce qui les fait bouger et à ce qui limite leur déplacement. On parle alors d'électrocinétique ou, quand des phénomènes magnétiques sont impliqués, d'électromagnétisme.

3.1 Circuit et courant

Toutes les applications de l'électricité exploitent la facilité avec laquelle l'énergie électrique peut être transférée d'une source à un appareil quelconque (fer à repasser, ampoule, télévision, ...). Ce transfert se fait via un *circuit électrique* reliant la source à l'appareil et permettant une circulation des électrons. Les sources d'énergie électrique sont multiples. La plus connue est la pile. Il en existe d'autres telles que les accumulateurs (piles rechargeables, batteries d'automobile, ...), les cellules solaires (photovoltaïque) ou les générateurs "mécaniques" tels que les dynamos, les éoliennes ou les turbines des barrages hydrauliques qui délivrent le courant dans nos prises de maison. Dans tout les cas, ces sources présentent au moins deux bornes chargées différemment, cette différence de charge impliquant une tension (ou différence de potentiel) entre ces bornes. Si on permet le passage des charges en reliant les deux bornes, un courant électrique s'installe naturellement. En contrepartie de

ce mouvement naturel des charges, il faut des sources conçues pour recréer en permanence une différence de potentiel entre leurs bornes.

On définit le courant électrique I comme la charge ΔQ passant par un endroit du circuit en un temps Δt . On a donc :

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \tag{3.1}$$

L'unité du courant est l'ampère (A) et, par définition du courant, on a : $A = C/s$ (les ampères correspondent à des coulomb par seconde).

Par convention, on fixe le sens du courant du + vers le - (du potentiel le plus élevé vers le potentiel le plus bas), c'est-à-dire dans le sens opposé au déplacement des électrons. La raison en est qu'on ne sait pas toujours ce qui se déplace. Si dans un métal ce sont les électrons (voir l'annexe F, page 91), on verra (voir annexe C) que dans un électrolyte ce sont simultanément des charges positives (les cations Cu^{++} d'une pile, par exemple) et des charges négatives (les anions SO_4^{--}). Dans un tube néon ce sont simultanément des électrons et des ions.

3.2 Résistance et loi d'Ohm

La facilité avec laquelle les charges "s'écoulent" entre deux bornes dépend de la façon dont on relie ces deux bornes. Si on les joint avec un fil conducteur,

André-Marie Ampère (1775-1836)

Les grandeurs liées à l'électricité ont été découvertes par plusieurs physiciens. Cela s'est fait non dans le seul cadre de l'électricité, mais aussi dans celui du magnétisme, tant ces deux matières sont liées.

Les textes d'Ampère ont donc un caractère électromagnétique qui les rends difficile à comprendre. Mais, ils soulignent bien l'artificiel de la séparation établie dans ce cours de deux domaines qui devraient n'en faire qu'un.

“l'intensité du courant est “ce qui passe d'électricité en temps égaux”, c'est-à-dire le débit d'électricité dans le conducteur.”

(Blondel, 1982, p. 157.)

Portrait d'André-Marie Ampère tiré de Wikipedia⁸



les charges n'auront aucune difficulté à se déplacer, alors que si au contraire on utilise un fil isolant, tout déplacement de charge sera rendu plus difficile, voire impossible. Cette faculté de la matière de laisser passer ou non les charges électriques définit une grandeur que l'on appelle la *résistance* R de la matière. La résistance des conducteurs (métaux, ...) est très faible alors que celle des isolants est grande, voire même quasi infinie. Elle se mesure en ohms, notés : Ω (oméga). On fabrique de manière industrielle de petits éléments de circuit (appelés résistances) dont la résistance peut varier entre quelques ohms et plusieurs millions d'ohms.

Le courant I qui circule entre les bornes d'une source de tension U est inversement proportionnel à la résistance du matériau liant les deux bornes. On écrit :

$$I = \frac{U}{R} \text{ ou encore } U = R \cdot I \quad (3.2)$$

Cette relation entre courant, tension et résistance est appelée **loi d'Ohm**. Elle permet de définir les unités de la résistance. En effet, on peut tirer de la loi d'Ohm que :

$$R = \frac{U}{I} \text{ et donc que } [R] = \frac{[U]}{[I]} = \frac{V}{A} = \Omega$$

La loi d'Ohm montre que pour une tension donnée, on peut placer dans le circuit une ou plusieurs résistances afin de limiter le courant. C'est le rôle principal des résistances dans les circuits.

D'autre part, pour un grand nombre de matériaux utilisables sous forme de fils cylindriques (métaux, carbone, ...), il existe une relation simple entre la résistance électrique du fil et ses caractéristiques géométriques (voir figure 3.1). Pour un élément de fil de longueur L et de section S , cette relation, connue sous le nom de **loi de Pouillet**, donne :

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \quad (3.3)$$

Le coefficient ρ , appelé *résistivité* électrique (unités : $\Omega \cdot \text{m}$), est une propriété intrinsèque du matériau utilisé et varie fortement d'une matière à l'autre, avec des valeurs typiques d'environ 10^{-8} $\Omega \cdot \text{m}$ pour les métaux, à environ 10^{10} à 10^{15} $\Omega \cdot \text{m}$ pour les isolants.

La résistivité d'une matière varie avec la température. Pour les métaux, elle augmente quand la température augmente (donc la résistance augmente),

Georg-Simon Ohm (1789-1854)

Voici l'expression de la loi d'Ohm par son auteur lui même. Évidemment, celle-ci est structurellement inscrite dans le cadre de la loi de Pouillet que l'expérience nécessite.

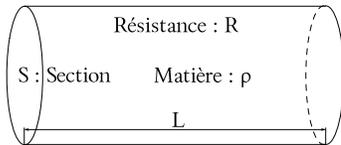
“[...] dans un circuit galvanique tel que nous le considérons, la quantité d'électricité qui traverse une section quelconque est partout la même en un instant donné puisque toutes les sections reçoivent constamment d'un côté la quantité d'électricité qu'elles abandonnent de l'autre. [...] la grandeur du flux électrique [...] est proportionnelle à la différence des tensions [...] et à un coefficient qui varie avec la nature et la structure des corps, c'est-à-dire au coefficient qui exprime la conductibilité [...]”

(Ohm, 1827, p. 36 et 44.)



Portrait de Georg-Simon Ohm tiré de Wikipedia⁹

FIGURE 3.1 – Loi de Pouillet



alors que pour certains matériaux, appelés semi-conducteurs, c'est l'inverse qui se produit. D'autres alliages ont une résistivité qui tend vers zéro lorsque la température devient très basse (proche du zéro absolu). Il s'agit de supraconducteurs.

3.3 Sécurité électrique

3.3.1 Introduction

Les problèmes de sécurité sont très importants en électricité.

Dans un premier temps, nous allons décrire en quoi l'électricité peut être dangereuse pour l'homme. Évidemment, l'auteur n'ayant jamais expérimenté sur l'homme, les données reportées ici sont la synthèse

d'éléments recueillis dans plusieurs ouvrages de référence ent (1988) sur le sujet. Les valeurs admises étant quelque peu variables en fonction de paramètres mentionnés plus loin, celles présentées ci-dessous sont à prendre pour des indications moyennes. Elles présentent cependant les divers ordres de grandeur qui sont à retenir dans les problèmes d'électrocution.

Dans un second temps, nous allons décrire les principaux systèmes de sécurité employés de nos jours dans l'électricité domestique. Seuls les principes seront présentés. L'objectif est de connaître leur existence et leur rôle précis, pour pouvoir le cas échéant s'assurer de leur existence ou en demander l'implantation à l'électricien en toute connaissance de cause. La connaissance des systèmes de sécurités permet aussi d'assurer une bonne protection des enfants et d'optimiser leur placement en conséquence.

Il faut rappeler que toute modification des systèmes électriques domestiques doit être agréée par un électricien professionnel. Mais, au vu de la vétusté des installations électriques de certaines maisons, il est important de pouvoir se rendre compte des problèmes éventuels pour pouvoir demander si nécessaire une intervention de l'électricien.

Claude Servais Mathias Pouillet (1790-1868)

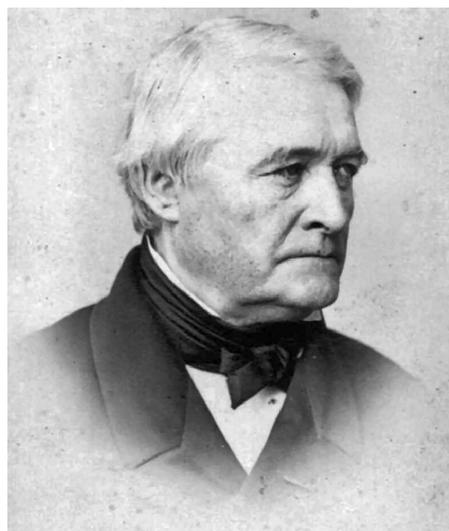
Voici la loi de Pouillet exprimée par Ohm :

“[...] le courant d’un circuit galvanique varie toutes les fois qu’on fait varier la grandeur d’une des forces électromotrices [la tension] [...] et cette dernière quantité dépend à son tour de la longueur réelle, de la conductibilité et de la section [...] Par conséquent, quand on se borne à comparer des circuits dans lesquels les parties [...] ont les mêmes longueurs réelles et les mêmes conductibilités, l’intensité du courant est en raison directe de la section de la partie [...] Si une portion d’un circuit galvanique est enlevée et remplacée par une autre partie, et que ce changement ne fasse varier ni la somme des forces électromotrices [les tensions], ni l’intensité du courant, [...] il en résulte que leurs longueurs réelles sont entre elles comme les produits de leurs conductibilités par leurs sections; par conséquent les longueurs réelles sont dans le rapport des conductibilités quand les parties ont la même section, et dans le rapport des sections quand la conductibilité est la même”

(Ohm, 1827, p. 53, 57 et 58.)

Portrait de Claude Pouillet tiré de Wikipedia¹⁰

On lui doit non seulement la loi qui porte son nom, qui aurait aussi pu être attribuée à Ohm (voir ci-contre), mais aussi un dispositif expérimental très connu permettant de mesurer le champ magnétique : la boussole des tangentes.

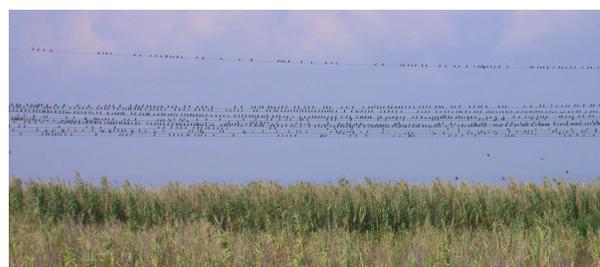
**3.3.2 L’électricité et l’homme**

Il faut bien comprendre que la grandeur fondamentale qui permet de prévoir la gravité des effets de l’électricité sur l’homme est le courant. Ce n’est pas la tension. En effet, on peut sans danger soumettre le corps humain à des tensions élevées. Tant que le courant qui le traverse reste très faible tout va bien. Or, pour une tension donnée, l’intensité du courant dépend de la résistance. C’est pourquoi, en fonction de la résistance du corps traversé, la même tension peut provoquer plus ou moins de dégâts.

L’exemple le plus connu est donné par la présence d’oiseaux sur les lignes haute-tension (voir figure 3.2).

Celles-ci ont une résistance très faible pour éviter qu’elles ne chauffent. Ainsi, lorsqu’un oiseau se pose sur un ligne haute-tension, la plus grande partie du courant va passer dans la ligne et non dans l’oiseau. La quantité de courant qui va traverser le volatile va

FIGURE 3.2 – La tension n’est pas forcément dangereuse.



dépendre de la tension entre ses deux pattes et de sa résistance corporelle. Comme généralement cette dernière est importante et que la tension entre les deux pattes est faible (on peut la calculer à partir du courant dans la ligne et de la résistance de la partie du fil qui se trouve entre les deux pattes ; le premier

est important, mais la seconde très faible), le courant traversant l'oiseau est très faible.

Bien entendu, ce n'est pas le cas lors d'un contact entre la ligne haute-tension et le pylône qui la soutient, qui lui est à une tension nulle. Alors, même si la résistance de l'oiseau est grande, la tension l'est aussi et le courant résultant peut devenir assez important pour qu'une électrocution se produise.

Facteurs importants

Tous types confondus, les facteurs principaux qui entrent en jeu sont :

- la conductibilité de la peau, son contact avec une surface mouillée,
- l'intensité du courant,
- le temps de passage du courant,
- la fréquence du courant,
- le trajet emprunté par le courant (passage en surface ou par le cœur de la personne).

Symptômes

Le tableau 3.1 donne une idée des effets du courant en fonction des ordres de grandeurs de celui-ci.

Les électrocutions liées à la foudre peuvent occasionner les symptômes suivants : arrêt cardiorespiratoire, brûlures importantes, problèmes neurologiques, lésions pulmonaires . . .

Traitements

Évidemment, il est nécessaire de mettre fin à l'électrocution le plus rapidement possible. Mais pas à n'importe quel prix. Il ne faut en aucun cas mettre la vie du sauveteur en danger. Pour cela il est nécessaire de ne pas intervenir directement sur la personne qui se fait électrocuter. Il faut couper le courant avant toute chose ou, à défaut, intervenir au moyen d'isolants protecteurs.

Ensuite, en cas d'arrêt cardiorespiratoire, un massage cardiaque externe et une ventilation assistée s'imposent. Puis viennent les traitements des brûlures.

TABLE 3.1 – Les effets du courant sur l'homme

| Courant en mA | Symptômes en alternatif 50 Hz |
|---------------|--|
| < 2 | rien ou léger picotement |
| 2 - 15 | Douleur, contraction musculaire maîtrisable |
| 15 - 100 | Tétanisation des muscles, danger d'asphyxie, troubles graves du rythme cardiaque |
| > 100 | Brûlures importantes en profondeur, arrêt cardiaque. |

3.3.3 Les mesures de sécurité

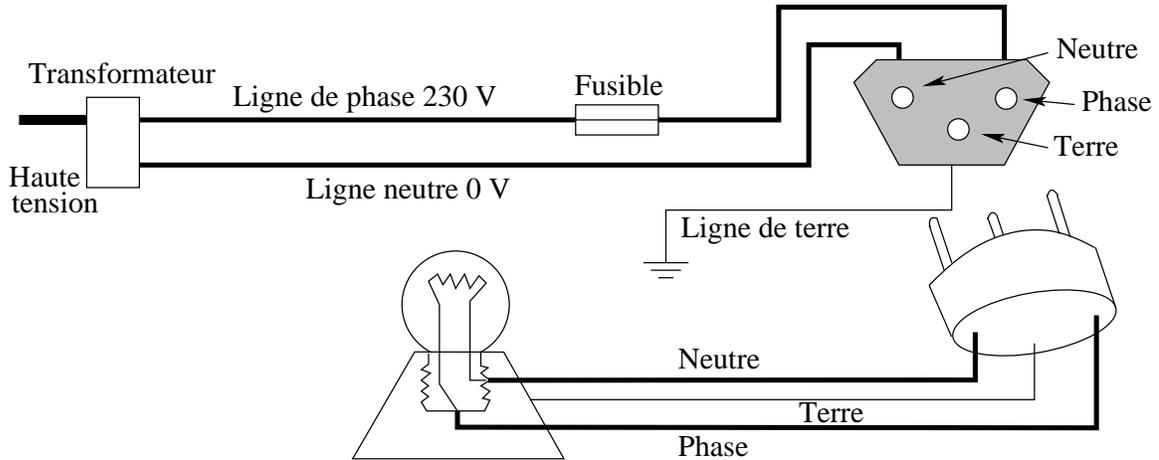
Le réseau électrique

Les installations électriques sont devenues si courantes qu'il existe dans tout appartement plusieurs sources de courant électrique sous la forme de ce qu'on appelle des "prises électriques". Nous allons décrire maintenant brièvement comment le courant y est distribué.

Les prises électriques sont le dernier maillon d'un réseau de distribution constitué de deux lignes (fils ou câbles de différentes sections ou structures) conductrices : la ligne neutre (ou le neutre) et la ligne de phase (ou la phase). On a schématiquement la situation de la figure 3.3.

La phase a une différence de potentiel avec le neutre de 230 V. C'est cette différence de potentiel qui est à l'origine de l'énergie fournie à l'appareil électrique. La phase est donc le fil chaud en ce sens que c'est entre ce fil et la terre (voir ci-dessous) que des accidents peuvent se produire. Alors que le neutre est le fil froid, puisque un contact entre celui-ci et la

FIGURE 3.3 – Schéma de principe d’une installation électrique.



terre est sans danger. Généralement on a encore (en Suisse) une ligne de terre (mise à la terre au niveau des bâtiments) qui sert à mettre le boîtier des appareils à la terre (voir plus loin). Normalement la phase est à droite (voir figure 3.3) par rapport à la terre sur les prises murales. Mais parfois les branchements peuvent être faux . . . , alors la prudence est de mise.

Pour s’assurer de la présence et de la position de la phase, de petits appareils nommés “tâteurs” sont vendus dans le commerce. Ce sont, en général, de petits tournevis recouverts d’un revêtement isolant et traversés par un axe formé d’un conducteur métallique suivi d’une forte résistance (pour limiter fortement le courant qui va traverser l’appareil) et terminé par une petite LED (diode électroluminescente), c’est-à-dire une petite lampe. Pour déterminer si la phase est active ou non (pour voir si on a retiré les bons fusibles), on introduit la pointe du tournevis (pas celle d’un tournevis normal attention!) dans la fiche murale et on touche son autre extrémité avec le doigt. Si la phase est active, un courant traverse l’axe du tournevis et notre corps, en raison de la tension qui existe entre la phase et la terre. Ce courant, modéré par la résistance pour nous être inoffensif, allume la LED, signalant la présence d’une phase active. Comme le circuit doit être en contact avec la terre, attention à l’utilisation de cet outil sur de échelles isolantes par

exemple. Dans ce cas, il se pourrait que la LED ne s’allume pas, alors que la phase est active.

Pour les bâtiments

La protection des bâtiments est assurée par les fusibles. On croit souvent, à tort, que ceux-ci servent à protéger les personnes. En réalité, avec des courants de rupture de plusieurs ampères (généralement 10 A), il ne les protègent pas du tout. Les fusibles servent à empêcher de trop forts courants dans les fils présents dans les murs des maisons. En effet, tout fil a un point de fusion qui dépend de la matière dont il est constitué. Ce point de fusion ne doit bien entendu jamais être atteint, sans quoi des incendies pourraient survenir. Or, la chaleur dégagée par le fil qui provoque l’augmentation de température est proportionnelle au carré du courant qui traverse le fil (voir paragraphe 3.4) :

$$E = R \cdot I^2 \cdot t$$

La valeur du courant doit donc être limitée. Par ailleurs, la chaleur dégagée dépend aussi de la résistance, qui elle même dépend de la section (ou du diamètre) du fil en raison de la loi de Pouillet (voir 3.2). La résistance du fil doit donc être faible et en conséquence son diamètre élevé (R est inversement

FIGURE 3.4 – Disjoncteurs



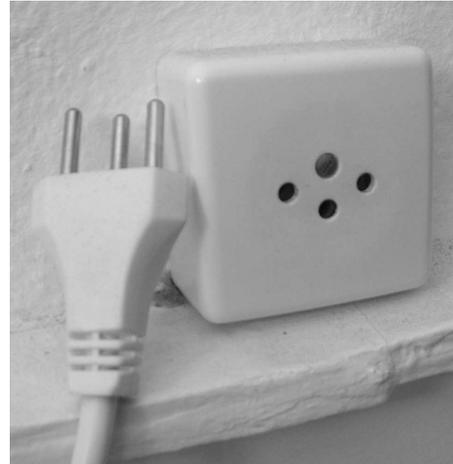
proportionnelle à la section). Or, le prix des fils de diamètre important est plus grand que celui des fils de faible diamètre . . .

On déduit de ce qui précède qu'il ne faut jamais remplacer un fusible d'une valeur donnée par un autre d'une valeur supérieure, sous peine de risquer l'incendie (au mieux, il peut y avoir fusion d'une partie du fil dans un mur par exemple et des coûts de réparation importants).

Mais alors, pourrait-on se dire, pourquoi ne pas mettre des fusibles dont le courant de rupture serait beaucoup plus faible? Le problème est que les appareils que nous employons demandent parfois, du point de vue de la puissance qui leur est nécessaire, des courants importants. On ne peut faire fonctionner une chaîne haute-fidélité, la télévision, un ordinateur, un fer à repasser simultanément avec un courant de 1 mA, dont la valeur le rendrait inoffensif. C'est pourquoi, l'équilibre des facteurs coût et puissance fournie mène à une valeur du courant de rupture des fusibles de 10 A pour les installations domestiques. Il va de soi qu'une usine peut avoir d'autres besoins.

Par ailleurs, aujourd'hui, les fusibles ont une forte tendance à être remplacés par des disjoncteurs (voir figure 3.4). Il s'agit en réalité de fusibles réarmables qui n'ont donc pas à être changés. Le fonctionnement des premiers disjoncteurs était aussi basé sur la chaleur dégagée par un fort courant, mais celle-ci servait par exemple à plier une lame métallique jusqu'à ce qu'elle ouvre le circuit pour couper le cou-

FIGURE 3.5 – Prises avec ligne de terre



rant. Ainsi, après avoir résolu le problème électrique qui avait amené à un courant trop important, on repositionnait la lame alors refroidie pour refermer le circuit et remettre en état de marche l'installation électrique. Aujourd'hui les disjoncteurs fonctionnent toujours avec une lame métallique, mais l'ouverture du circuit se fait par attraction magnétique de celle-ci.

Pour l'homme

Essentiellement, trois systèmes de protection pour l'homme existent en Suisse :

- Les protections par embout enfichable dans la prise ou par masquage de la phase et du neutre par une lamelle plastique à l'intérieur du boîtier de la prise. Il s'agit simplement d'empêcher l'utilisation de la prise avec des objets pointus non prévus pour l'alimentation d'appareils électriques. C'est la première mesure de protection des enfants.
- La ligne de terre (voir figure 3.5). Elle consiste en un fil soudé au boîtier de l'appareil électrique et relié à la terre. Si un défaut quelconque vient à faire toucher la phase avec le boîtier de l'appareil, sans la terre, celui-ci serait porté à un potentiel de 230 V. Comme la plupart des ap-

FIGURE 3.6 – Disjoncteur à courant de défaut (FI)



pareils actuels sont isolés du sol par divers petits pieds en plastique, la phase ne débite aucun courant anormal qui puisse faire sauter le fusible. Il suffit alors de toucher le boîtier pour que l'accident se produise (rappelons que le fusible ne protégera pas la personne puisqu'il est prévu pour sauter pour des courants importants de plusieurs ampères, protégeant ainsi des dommages d'incendie).

Par contre, si le boîtier est relié à la terre par un fil bon conducteur, au moment où on met la prise de l'appareil, un fort courant va pouvoir s'établir entre la phase et la terre par l'intermédiaire de la prise de terre. Ce fort courant va faire sauter le fusible et tout danger sera écarté.

- Le disjoncteur à courant de défaut (ou FI pour False Intensity ; voir figure 3.6). Il ne s'agit pas d'un disjoncteur classique. Son fonctionnement est tout autre. En substance, on peut dire qu'un tel disjoncteur compare le courant entrant avec celui qui sort. Si la différence dépasse une certaine valeur (2 mA pour la protection des personnes), le disjoncteur coupe automatiquement le courant. Un FI est systématiquement posé pour les nouvelles constructions sur les lignes des salles de bain, dans les caves et à l'extérieur des maisons.

Enfin, il faut dire quelques mots de deux appareils de mesure très utilisés. L'un devrait être présent dans tous les ménages tant il est utile du point de vue de la sécurité et bon marché et l'autre est nécessaire dans toute situation où des tensions ou des courants sont à mesurer précisément :

FIGURE 3.7 – Tâteur
Un tournevis très spécial

- Le tâteur (voir figure 3.7) est un appareil en forme de tournevis enrobé d'une gaine plastique. Il s'agit d'un conducteur métallique, isolé par une gaine plastique, relié à une petite lampe (LED) et à une résistance. Il fonctionne en introduisant la partie "tournevis" dans la phase d'une prise électrique, par exemple, et en touchant son autre extrémité (le bout du manche du tournevis) avec le doigt. On permet ainsi à un courant très faible, car limité par la résistance, de circuler de la phase au sol à travers le corps. Ce courant est néanmoins suffisant pour illuminer la LED et ainsi marquer la présence d'une tension (les 230 V de la phase par exemple) et donc celle d'un endroit potentiellement dangereux. On utilise communément cet appareil pour déterminer si on a bien coupé le courant avant de procéder à l'installation d'un culot d'ampoule par exemple.
- Le multimètre est un appareil permettant la mesure des grandeurs suivantes : courant alternatif, courant continu, résistance, tension continue et tension alternative. Il permet aussi parfois de tester un conducteur métallique d'un bout à l'autre pour savoir s'il n'est pas interrompu. Il permet de déterminer la tension entre deux points. On peut ainsi, en mode volt-mètre, tester si une pile peut encore fonctionner ou savoir si un point quelconque se trouve à une tension donnée potentiellement dangereuse. Il permet aussi de déterminer le courant qui traverse un appareil et ainsi, en connaissant la tension, de trouver la puissance qu'il consomme. Attention, un multimètre en mode ampèremètre ne doit pas être directement branché entre la phase et le neutre, car il fait alors office de court-circuit (un circuit de très faible résistance) entre les deux, provoquant un très fort courant qui peut être dommageable et faire

“sauter les plombs”.

3.4 Énergie et puissance électrique

Par définition du potentiel électrique, le travail A (ou l'énergie E emmagasinée) effectué par une charge q se déplaçant entre deux points présentant une différence de potentiel (ou une tension) U est donné par (voir annexe D.2) :

$$\boxed{E = A = q \cdot U} \quad (3.4)$$

On définit de manière tout à fait générale (en électricité comme en mécanique) la puissance comme étant le travail (ou l'énergie) fourni par unité de temps, c'est-à-dire :

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

Dans le cas présent, on a :

$$P = \frac{A}{t} = \frac{q \cdot U}{t} = \frac{q}{t} \cdot U = I \cdot U$$

Ainsi, on peut écrire :

$$\boxed{P = U \cdot I} \quad (3.5)$$

P étant la puissance fournie à un circuit par une source de tension U débitant un courant I . Elle se mesure en watt (W). Dans un circuit simple, cette puissance ne peut pas être stockée dans le circuit. Elle sert donc à faire fonctionner le ou les appareils du circuit. Dans le cas le plus simple d'un circuit ne comprenant qu'une résistance, cette puissance est entièrement dissipée par la résistance sous forme de chaleur. Comme $U = R \cdot I$ et qu'en conséquence $I = U/R$, on peut trouver, pour la puissance dissipée, deux expressions équivalentes à l'équation 3.5 :

$$\boxed{P = R \cdot I^2 \text{ et } P = \frac{U^2}{R}} \quad (3.6)$$

Cette dissipation sous forme de chaleur suggère une analogie entre la résistance électrique et les forces de frottements mécaniques. Un frottement implique une

perte d'énergie mécanique qu'on retrouve sous forme de chaleur (énergie thermique), alors que la résistance électrique (“frottement” des électrons dans la matière) implique également une dissipation d'énergie électrique sous forme d'énergie thermique ... On voit ici l'intérêt des matières supraconductrices, c'est-à-dire des matières de résistance quasi nulle, permettant un transport du courant sans pertes thermiques.

L'équation 3.5 est intéressante du point de vue de la sécurité.

On peut voir au paragraphe D.2, page 87 que la tension est la différence de potentiel et, avec l'équation D.1, page 88, que la tension est proportionnelle au champ électrique et à la distance entre les points considérés. Cela signifie que pour une distance donnée, en augmentant la tension, on augmente le champ électrique. Or, celui-ci peut être à l'origine de décharges. Dans l'air, par exemple, celui-ci est de l'ordre de 30 kV/cm. Entre deux contacts séparés par 1/10 mm, une tension de $30'000 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} = 3$ V suffit pour que des décharges soient envisageables. Ainsi, pour les éviter entre les pôles de petits connecteurs, il faut une faible tension.

Pour des connecteurs USB, elle a été fixée à 5 V, ce qui permet d'éviter ces décharges et ne présente aucun danger pour une personne même mouillée, car avec une résistance corporelle correspondante très basse de 1000 Ω , on aurait seulement un courant $i = U/R = 5/1000 = 5$ mA.

Par ailleurs, cette équation (3.5) est aussi intéressante du point de vue de la puissance. En effet, pour charger un smartphone sur une prise murale dont la tension est de 230 V, il faut un transformateur qui va abaisser la tension à 5 V. Or, pour des raisons de coût, lié aux bobines qui le composent, chaque transformateur a une limite maximale de courant. Typiquement, on trouve des transformateurs à 500 mA, 1 A ou 2 A. Plus le courant qu'ils fournissent est important, plus ils sont chers.

Ainsi, typiquement, la puissance électrique disponible pour charger un smartphone est alors respecti-

vement de :

$$P = U \cdot I = 5 \cdot 0.5 = 2,5 \text{ W}$$

$$P = U \cdot I = 5 \cdot 1 = 5 \text{ W}$$

$$P = U \cdot I = 5 \cdot 2 = 10 \text{ W}$$

Ainsi, comme la puissance s'élève avec le courant, le temps de charge du smartphone diminue avec celui-ci. Comme on va le voir au paragraphe 3.5, il est calculable en fonction de l'énergie qu'il faut mettre dans sa batterie.

Mais revenons à l'énergie.

Comme, par définition, l'énergie est égale à la puissance multipliée par le temps, on en déduit que l'énergie E fournie par une source ou dissipée par une résistance en un temps t vaut :

$$\begin{aligned} E &= U \cdot I \cdot t \text{ ou} \\ E &= R \cdot I^2 \cdot t \text{ ou} \\ E &= \frac{U^2}{R} \cdot t \end{aligned} \quad (3.7)$$

La première expression de l'équation 3.7 porte parfois le nom de "loi de Joule" et le phénomène d'échauffement thermique qu'elle traduit porte celui d'"effet Joule". Alors qu'une énergie est mesurée en joules (J) dans les unités du système international, l'énergie électrique est aussi souvent exprimée en kWh(kilowattheure). En effet, l'énergie s'écrivant :

$$\boxed{E = P \cdot t} \quad (3.8)$$

on peut définir le kWh comme étant l'énergie fournie par une puissance de 1 kW pendant une heure. On a donc que $1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3'600'000 \text{ J} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$. Ainsi, malgré la présence du terme Watt dans cette unité, ce n'est pas une puissance!

Cette unité est très utilisée pour le décompte de l'électricité domestique. En effet, les compteurs d'électricité sont gradués en kWh et la facture donne l'énergie consommée en kWh.

A titre purement indicatif (et provisoire), en 2012, l'électricité domestique est facturée aux ménages neuchâtelois au prix approximatif (car cela dépend de

l'heure à laquelle elle est consommée) de 20 ct le kWh. La même énergie fournie sous forme de yaourt coûterait environ 2,7 CHF. D'autre part, la quantité moyenne d'énergie électrique consommée par ménage chaque année est d'environ 2000 kWh.

3.5 Accumulateurs

3.5.1 Équations

Le calcul du temps de décharge d'un accumulateur se fait sur la base de son énergie emmagasinée. Celle-ci est donnée par l'équation 3.4 :

$$E = q \cdot U$$

où il est d'usage de ne pas utiliser les unités du système international qui donneraient une énergie E en joule à partir d'une charge q en coulomb et d'une tension U en volt. On préfère utiliser :

$$\begin{aligned} [q] &= A \cdot h \\ [U] &= V \\ [E] &= W \cdot h \end{aligned}$$

L'unité de charge est justifiée par la définition du courant électrique. En effet, à partir de l'équation 3.1, on a :

$$\Delta q = I \cdot \Delta t \Rightarrow [q] = [I] \cdot [t] = A \cdot h$$

On a alors :

$$[E] = [q] \cdot [U] = A \cdot h \cdot V = A \cdot V \cdot h = W \cdot h$$

Ainsi, l'utilisation de ces unités particulières permet d'obtenir l'énergie en Wh et, par là, en kWh pour autant que le temps utilisé soit en heures. Or, le kWh est l'unité d'énergie la plus couramment utilisée.

Relevons cependant qu'il est possible de faire les calculs dans les unités du système international. La charge est alors en coulomb, la tension en volt, l'énergie en joule et le temps en seconde.

La charge q est parfois appelée *capacité*. C'est regrettable en raison de la confusion possible avec la capacité d'un condensateur. Mais l'utilisation de ce terme pour les accumulateurs est assez courante pour

que cela soit mentionné. Notamment, le fabricant fournit en général l'indication de la capacité nominale C_5 des accumulateurs. Il s'agit de la charge minimale fournie par 95 % de ses accumulateurs lors d'une décharge de cinq heures, soit avec un courant nominal de décharge de $C_5/5$ (le courant nécessaire pour que la batterie se décharge en cinq heures).

Par exemple^a, un accumulateur de 1800 mAh de capacité nominale sous une tension de 1,2 V contient une énergie E donnée par :

$$E = q \cdot U = 1800 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 = 2,16 \text{ Wh}$$

Comme on a :

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

si on le branche sur une ampoule d'une puissance de 2 W, son temps de fonctionnement vaut alors :

$$t = \frac{2,16}{2} = 1,08 \text{ h}$$

On trouve aussi le courant utilisé par :

$$P = U \cdot I \Leftrightarrow I = \frac{P}{U} = \frac{2}{1,2} = 1,67 \text{ A}$$

et on retrouve le temps de fonctionnement :

$$I = \frac{q}{t} \Rightarrow t = \frac{q}{I} = \frac{1,8}{1,67} = 1,08 \text{ h}$$

Le courant nominal de décharge quant à lui vaut :

$$I = \frac{C_5}{5} = \frac{1,8}{5} = 360 \text{ mA}$$

En effet, on a :

$$I = \frac{q}{t} \Rightarrow t = \frac{q}{I} = \frac{1,8}{0,36} = 5 \text{ h}$$

On exprime alors le courant de décharge dans l'ampoule comme un multiple de la capacité nominale :

$$I = 1,67 = 4,63 \cdot C_5$$

Ce qui signifie que l'accumulateur se déchargera en $4,63 \times$ moins de temps qu'en régime nominal, c'est-à-dire en :

$$\frac{5}{4,63} = 1,08 \text{ h}$$

a. Les exercices 39 et 40 portent sur le même sujet.

FIGURE 3.8 – Accumulateurs Ni-MH et lithium-ion



3.5.2 Types d'accumulateurs

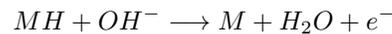
Il existe actuellement trois sortes d'accumulateurs disponibles sur le marché. Il s'agit des

- accumulateurs au Ni-Cd (nickel-cadmium),
- accumulateurs au Ni-MH (nickel-hydrure métallique) et
- accumulateurs au Lithium-ion.

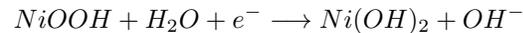
La figure 3.8 en présente trois : au-dessus deux accumulateurs Ni-MH, avec sur l'un l'indication de sa capacité nominale, et au-dessous un accumulateur lithium-ion pour un ordinateur portable.

On ne trouve presque plus de Ni-Cd. Il reste disponible pour quelques applications spécifiques, comme les fortes puissances ($I > 5 \cdot C_5$) ou les hautes températures ($T > 50^\circ$). Il a été remplacé par le Ni-MH. Ce dernier présente en effet plusieurs avantages sur le Ni-Cd comme de 30 à 50% de capacité en plus pour le même volume, le fait qu'il soit sans cadmium, ni mercure, ni plomb et que l'effet mémoire (voir plus loin) soit réversible. Les réactions aux électrodes sont présentées ci-dessous.

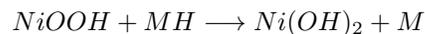
La réaction à l'anode est donnée par :



La réaction à la cathode est la suivante :



Le total des deux équations donne :



L'électrolyte utilisé est : KOH

La tension nominale de l'élément est : 1,2 V

Autant le Ni-Cd que le Ni-MH présentent un effet mémoire. Il s'agit de réactions chimiques non désirées qui transforment l'accumulateur en matières qui se déchargent moins facilement que celles d'origine. En cas de décharges répétitives incomplètes, le résultat est que l'accumulateur rend progressivement de moins en moins d'énergie. Pour le Ni-Cd, l'effet est irréversible. Par contre, pour le Ni-MH, l'effet peut être largement atténué par une suite de décharges profondes.

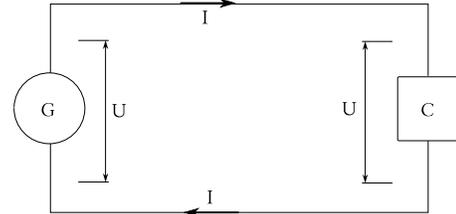
Pour le lithium-ion, l'effet mémoire n'existe pas. De plus, c'est un accumulateur très léger et la tension reste particulièrement stable pendant la décharge, ce qui en fait un candidat de choix pour les dispositifs sensibles à ce paramètre. Mais il est difficile à obtenir et est relativement cher. Il est idéal pour des applications où la recharge est régulièrement incomplète, comme pour les portables (téléphones et ordinateurs).

Il faut encore dire quelques mots des chargeurs d'accumulateurs. Deux problèmes se posent à eux : l'effet mémoire et l'arrêt de la charge. En ce qui concerne le premier, les chargeurs de qualité commencent par décharger totalement l'accumulateur pour éviter l'effet mémoire. Ils présentent donc une indication lumineuse de décharge, puis une autre de charge et enfin une troisième de fin de charge. Évidemment, cela permet de préserver la capacité de l'accumulateur. Quant au second, il faut relever que le processus de fin de charge est complexe. La tension et la température sont des paramètres utilisés par les chargeurs pour estimer la fin de charge et l'arrêter avant que l'accumulateur ne soit endommagé. Les chargeurs à faible coût n'intégrant pas de tels dispositifs, la durée de vie des accumulateurs s'en trouve fortement réduite.

3.6 Circuits électriques : les multiprises

Avant d'expliquer précisément le fonctionnement des multiprises, il est nécessaire de présenter les deux

FIGURE 3.9 – Circuit électrique
G : générateur ; C : consommateur



types de circuits permettant d'associer deux appareils électriques.

Un appareil électrique fonctionne sous une tension donnée. Elle est nécessaire pour qu'un courant électrique circule dans l'appareil en entrant par un fil, la phase, et en ressortant par un autre, le neutre. La tension est délivrée par un générateur ou, plus communément, par l'intermédiaire d'une prise murale. Sans tenir compte du caractère alternatif ou continu de la tension et du courant, on peut représenter le circuit permettant à l'appareil de fonctionner comme décrit sur la figure 3.9.

3.6.1 Circuit série

La façon la plus simple d'associer deux consommateurs est de les relier l'un à la suite de l'autre, comme présenté sur la figure 3.10. Le courant qui traverse le circuit est alors toujours le même. Par contre, la tension U aux bornes du générateur se décompose aux bornes des consommateurs en deux tensions U_1 et U_2 dont la somme donne U .

$$I \text{ identique partout} \quad (3.9)$$

$$U = U_1 + U_2 \quad (3.10)$$

3.6.2 Circuit parallèle

La seconde manière d'associer deux consommateurs est de les relier bornes à bornes au générateur, comme présenté sur la figure 3.11. La tension U aux bornes de chaque consommateur est alors la même que celle du générateur. Par contre, le courant se divise en deux courants I_1 et I_2 dont la somme donne

FIGURE 3.10 – Circuit série
G : générateur ; C : consommateur

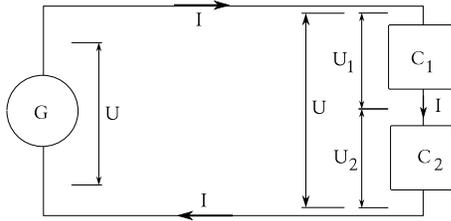


FIGURE 3.11 – Circuit parallèle
G : générateur ; C : consommateur

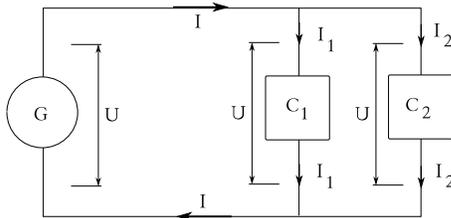
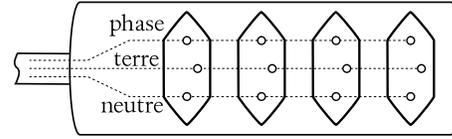


FIGURE 3.12 – Une multiprise
Un modèle parmi d'autres



FIGURE 3.13 – Schéma de multiprise



Lorsqu'on veut brancher deux ou plusieurs appareils usuels, tels qu'une lampe, un aspirateur, une radio, ... on utilise une multiprise. Comme le montrent les figures 3.12 et 3.13, celle-ci permet de mettre en parallèle les appareils. En effet, ils sont adaptés pour un fonctionnement sous une tension fixe ($U = 230\text{ V}$) et seul un tel branchement le permet. Ainsi, mettre un appareil sur une multiprise revient au même que le brancher directement sur la prise murale. Évidemment, mettre un appareil supplémentaire implique une augmentation du courant entrant dans celle-ci. Ce dernier est la somme des courants utilisés par chacun des appareils branchés sur la multiprise. Il est facile de le déterminer si on connaît la puissance utilisée par chaque appareil. En effet, la tension de fonctionnement étant la même pour chacun, on peut écrire :

$$P_{tot} = \sum P = \sum U \cdot I = U \cdot \sum I$$

$$= U \cdot I_{tot} \Rightarrow I_{tot} = \frac{P_{tot}}{U}$$

Par exemple, trois appareils de puissances respectives 30 W, 500 W et 1000 W sous 230 V nécessitent un courant :

$$I = \frac{30 + 500 + 1000}{230} = 6,65\text{ A}$$

En effet, les courant nécessaire pour assurer les puissances des appareils sont :

$$I_1 = \frac{30}{230} = 130\text{ mA}$$

$$I_2 = \frac{500}{230} = 2,17\text{ A}$$

$$I_3 = \frac{1000}{230} = 4,35\text{ A}$$

$$\Rightarrow I_{tot} = 0,130 + 2,17 + 4,35 = 6,65\text{ A}$$

I .

$$U \text{ identique générateur et consommateurs } (3.11)$$

$$I = I_1 + I_2 (3.12)$$

L'annexe E présente le cas particulier de l'association de deux résistances en série ou en parallèle et développe la notion de résistance équivalente.

Ainsi, plus on branche d'appareils, plus le courant total nécessaire est grand. Rappelons que s'il dépasse la valeur du fusible (ou disjoncteur) de protection contre les incendies (généralement 10 A), celui-ci coupe le courant. C'est la raison pour laquelle lorsque plusieurs appareils sont en fonctionnement, il arrive que les "plombs" sautent en branchant un supplémentaire.

RÉSUMÉ DES GRANDEURS ET UNITÉS

| Grandeur | Définition | Unité |
|-------------|---------------------------|------------------|
| Charge | q | C ou Ah |
| Courant | $I = \Delta q / \Delta t$ | A = C/s |
| Tension | $U = A/q$ | V = J/C |
| Résistance | R | Ω |
| Résistivité | ρ | Ωm |
| Énergie | $E = P \cdot t$ | J ou kWh |
| Puissance | $P = \frac{E}{t}$ | W |

Sécurité électrique

Ordre de grandeur du courant :

- < 2 mA aucun danger
- 2 – 15 mA danger maîtrisable
- 15 – 100 mA danger important
- > 100 mA risque mortel

Énergie et puissance

$$U = R \cdot I \text{ loi d'Ohm} \quad (3.13)$$

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \text{ loi de Pouillet} \quad (3.14)$$

$$P = U \cdot I \quad (3.15)$$

$$P = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R} \quad (3.16)$$

$$E = q \cdot U \quad (3.17)$$

Systèmes de protection des personnes :

Embouts, ligne de terre et disjoncteurs à courant de défaut (FI).

FIGURE 3.14 – Résumé d'électrocinétique

Magnétisme

4.1 Introduction

La force magnétique est connue depuis bien longtemps. Pourtant, elle ne fut “découverte” mathématiquement que bien après la gravitation et l’électricité. A cela deux raisons. Premièrement, l’influence des lois de la gravitation universelle et de la loi de Coulomb s’est longtemps fait sentir, en cela que les physiciens travaillant sur le magnétisme ont longtemps cherché à exprimer la force magnétique avec une loi formellement identique aux deux autres lois. Or, la force magnétique est fondamentalement différente, puisqu’elle ne s’exerce pas dans la direction qui lie les charges aux corps qui produisent le magnétisme. Deuxièmement, il fallait savoir produire des courants électriques pour pouvoir se rendre compte des relations entre courant électrique et magnétisme. C’est pourquoi, de nos jours encore, on doit enseigner le magnétisme après l’électricité.

4.2 Le champ magnétique

D’emblée ici, on ne va plus parler de force. Pourtant, c’est bien elle qui nous intéresse si on désire prédire le comportement mécanique d’un objet quelconque. Mais, les connaissances acquises en électricité ne doivent pas être oubliées. En effet, la force magnétique est au premier abord une force qui s’exerce instantanément et à distance entre deux aimants, par exemple. Or, en électricité, nous avons décrit les ob-

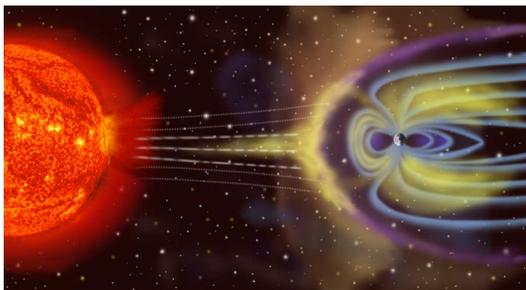
jections soulevées par les physiciens à l’encontre d’une action instantanée et à distance. Ces objections nous ont mené à revoir la force électrique comme l’action d’une grandeur très particulière nommé “champ électrique”. En effet, la notion de champ électrique règle définitivement les problèmes posés par une action instantanée et à distance.

Fort de ces connaissances, nous allons aborder le magnétisme en parlant directement de champ magnétique. C’est cet “objet” qui sera responsable de l’action magnétique entre les aimants. Et cette action sera d’emblée localisée et non-instantanée. L’objectif sera donc de décrire les principales propriétés de ce champ magnétique.

Puis nous reviendrons à la force à partir de celui qui la crée (le champ) et verrons deux relations particulières qui nous permettent de la trouver sans trop de difficultés.

4.2.1 Définitions

Elles se basent sur l’observation d’une boussole. Conventionnellement, on peut nommer la partie de la boussole qui montre le nord, “pôle nord” et celui qui montre le sud, “pôle sud”. Ces définitions sont purement conventionnelles et paraissent à première vue logiques. A partir de ces définitions, on peut nommer les deux parties d’un aimant en forme de tige en le posant sur une pointe pour lui permettre de tourner et en notant l’orientation de celui-ci dans le champ

FIGURE 4.1 – La magnétosphère
Protection contre les radiations solaires¹¹

magnétique terrestre. Le côté qui pointera vers le nord sera nommé “pôle nord” de l’aimant et celui qui pointe vers le sud “pôle sud”. On constatera alors par expérience que le pôle nord de l’aimant repousse le pôle nord de la boussole. Par contre, il attire son pôle sud. Il en va de même avec deux aimants. Ainsi on peut dire que deux pôles identiques se repoussent et deux pôles différents s’attirent.

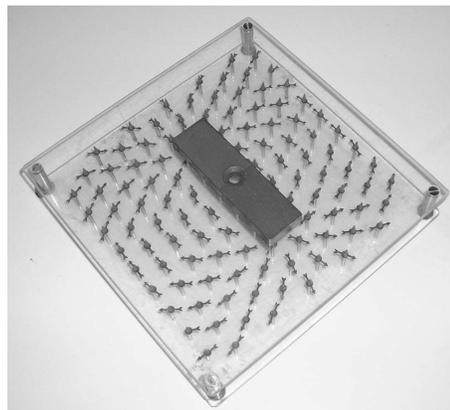
Par ailleurs, on a vu en électricité que le champ électrique est un vecteur (nous ne reviendrons par sur le pourquoi de ce fait). On va considérer de la même manière le champ magnétique. Ainsi, on est amené à définir le champ magnétique par un vecteur dont la direction est celle donnée par la boussole, dont le sens est celui d’une flèche qui pointe vers le nord (c’est un choix arbitraire mais judicieux), et dont la valeur est donnée en tesla (T), en hommage au physicien Tesla qui découvrit la notion de champ magnétique.

4.2.2 Le champ magnétique terrestre

On peut étudier le champ magnétique produit par un aimant droit en plaçant tout autour de lui de petites boussoles. Elles forment alors, en s’orientant, des lignes de champ magnétique. La figure 4.2 montre les lignes de champ autour d’un aimant droit. On remarque que le champ sort du pôle nord de l’aimant et rentrent dans le pôle sud. En effet, le pôle nord des petites boussoles est attiré par le pôle sud de l’aimant et pointe donc vers lui. Ainsi les lignes de champ vont, par l’extérieur de l’aimant, du pôle nord au pôle sud.

Cela constitue un premier modèle du champ ma-

FIGURE 4.2 – Lignes de champ magnétiques autour d’un aimant droit

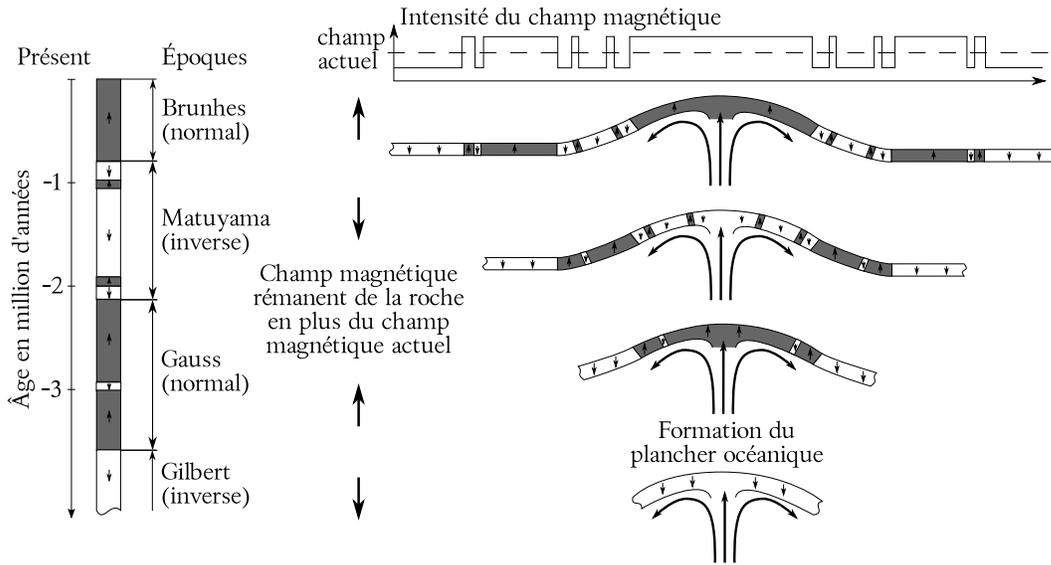


gnétique terrestre. On peut en effet s’imaginer qu’il existe au centre de la Terre un gros aimant semblable à celui de la figure 4.2 qui produit à la surface de la Terre des lignes de champ magnétique qui vont du sud vers le nord géographique.

En conséquence, si on considère la Terre comme une sorte de gros aimant, son pôle nord magnétique se trouve au sud géographique. En effet, le pôle sud de la boussole est attiré par un pôle nord. Or, le pôle sud pointe ... vers le sud. Donc, un pôle nord magnétique s’y trouve. En réalité, le champ magnétique terrestre est très semblable à celui d’un aimant droit. Mais, comme le montre la figure 4.1, il est déformé par le vent solaire. Il joue cependant un rôle protecteur contre les radiations provenant du Soleil en les déviant de la trajectoire de la Terre. Parfois, cependant, celles-ci suivent les lignes de champ magnétique et sont canalisées vers les pôles pour former, au contact de l’atmosphère, des aurores boréales.

Les raisons de l’existence d’un champ magnétique terrestre sont encore mal connues. Un modèle d’explication simple sera néanmoins présenté au paragraphe 4.2.4. Au préalable, il est nécessaire de savoir assez précisément ce qui produit le champ magnétique. Les relevés du champ magnétique à la surface de la Terre, et notamment sur les plaques océaniques, ont montré que le champ magnétique terrestre s’inverse périodiquement.

FIGURE 4.3 – Anomalies magnétique
Fluctuations magnétiques enregistrées par le plancher océanique.



diquement au bout d'un temps variable d'un intervalle moyen de l'ordre de 250'000 ans. En effet, on peut observer sur le plancher océanique du Pacifique par exemple, des bandes de roches magnétisées dont l'orientation est identique, mais s'inverse en passant d'une bande à l'autre. En réalité, on mesure uniquement l'intensité du champ magnétique terrestre au voisinage des roches du plancher océanique. Or, le champ produit par celles-ci a une intensité bien plus faible que le champ terrestre. Ainsi, quand le champ magnétique de la roche est dans le sens contraire au champ terrestre, il diminue légèrement son intensité. Par contre, si le champ de la roche est dans le même sens que le champ terrestre, il augmente légèrement celui-ci. On parle ainsi ainsi d'anomalies magnétiques positive et négative.

Cela s'explique par le fait que, pendant la formation du plancher océanique au niveau des dorsales^a, la roche fige l'orientation du champ magnétique au

a. Une dorsale constitue le lieu où se forme le plancher océanique. Il s'agit de remontées magmatiques qui forment des coussins de lave au contact de l'eau froide. Ceux-ci se solidifient en s'éloignant de la dorsale.

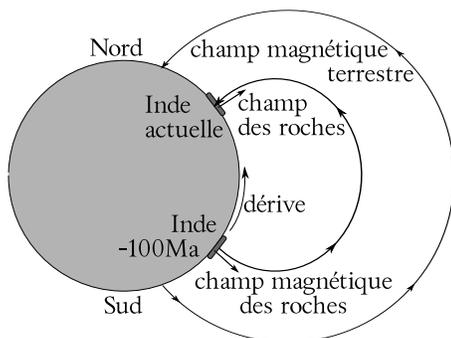
moment de son refroidissement au contact de l'eau. S'éloignant ensuite des deux côtés des dorsales, les roches emportent avec elles l'orientation du champ magnétique présent à la surface de la Terre au moment de leur solidification. Ce champ se superpose à celui du champ actuel et crée des anomalies positives et négatives. Parallèlement aux dorsales, les bandes ainsi créées (voir figure 4.3) montrent l'inversion périodique du champ magnétique et ont constitué historiquement un argument important en faveur de la dérive des continents (voir figure 4.4).

Notons finalement que la valeur de la composante horizontale du champ magnétique terrestre à la surface de la Terre (à la Chaux-de-Fonds, Suisse, 2006) vaut :

$$B_{terrestre} = 21.594 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

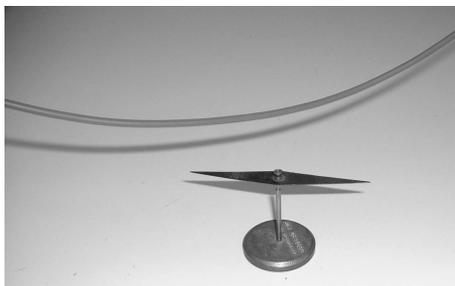
4.2.3 L'expérience d'Ørsted

Avant cette expérience, la science du magnétisme n'était que qualitative. Ørsted a permis de mathématiser le magnétisme en faisant comprendre précisément l'origine de celui-ci. En réalité, son expérience

FIGURE 4.4 – Dérive des continents
Inversion du champ des roches.

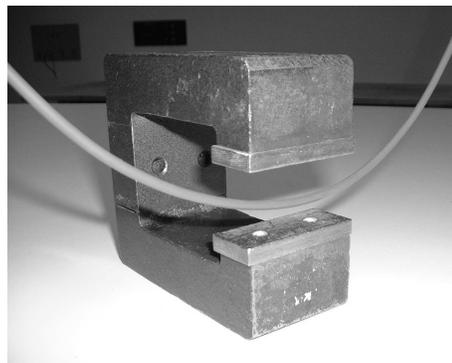
fut le fruit du hasard. Il remarqua un jour qu'en enclenchant le courant électrique dans un fil à proximité d'une petite boussole, il la faisait tourner (voir figure 4.5).

FIGURE 4.5 – Ørsted et la boussole



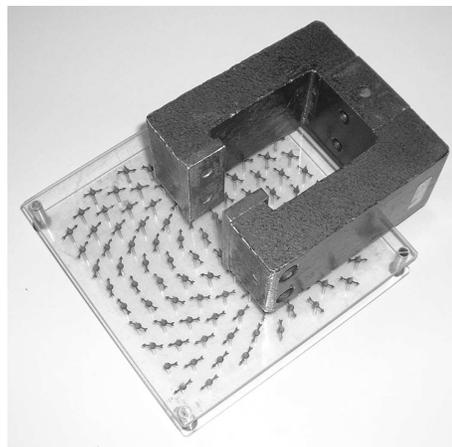
Cette constatation était fondamentale puisqu'elle reliait l'électricité au magnétisme. De plus, plus le courant était fort, plus la déviation était importante. Mais elle ne se produisait pas dans certains cas : fil est-ouest, au-dessus de l'aiguille et courant vers l'est ou fil est-ouest, au-dessous de l'aiguille et courant vers l'ouest. Et, bien évidemment, elle ne se produisait pas sans courant. D'où l'hypothèse que l'origine du magnétisme se trouve dans la présence de courant électrique. D'où aussi une autre expérience qui consiste à placer un fil parcouru par un courant à l'intérieur de l'entre-fer d'un aimant en U (voir figure 4.6).

FIGURE 4.6 – Ørsted et la déviation du fil



On peut montrer, en étudiant les lignes de champ à l'intérieur de l'entre-fer d'un aimant en U, que le champ magnétique dans cette zone de l'aimant est rectiligne et uniforme (voir figure 4.7).

FIGURE 4.7 – Aimant en U

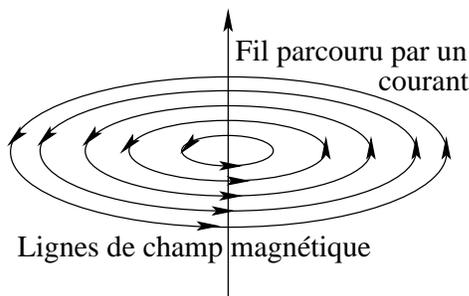


Ainsi, si le pôle nord de l'aimant est en bas et le sud en haut, le champ magnétique est vertical vers le haut. Alors, si on fait passer un courant électrique dans le fil, de gauche à droite par exemple, il s'exerce sur le fil une force qui le déplace à l'extérieur de l'aimant. Si on inverse le sens du courant, le sens de la force s'inverse. De même que si on inverse les pôles

de l'aimant.

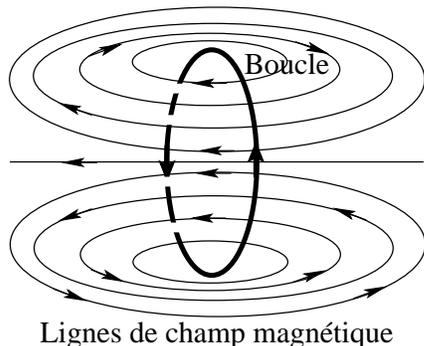
Un courant électrique rectiligne est donc producteur d'un champ magnétique qui peut interagir avec le champ magnétique d'un aimant, comme le ferait un autre aimant. On peut donc étudier le champ produit par un fil droit, puis par une boucle de fil et par un solénoïde (ensemble de boucles). Ces lignes sont représentées dans les figures 4.8, 4.9 et 4.10.

FIGURE 4.8 – Champ magnétique produit par un fil droit



Le sens de rotation des lignes de champ est donné par la règle du tire-bouchon avec le pouce (de la main droite) dans le sens du courant du fil. Les autres doigts se refermant donnent alors le sens de rotation des lignes de champ.

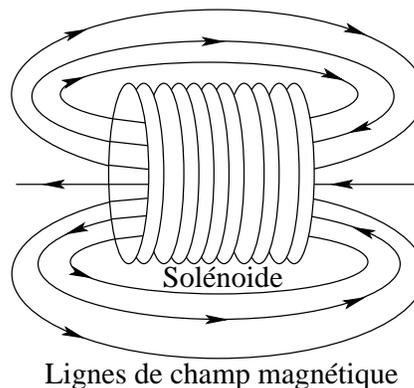
FIGURE 4.9 – Champ magnétique produit par une boucle de courant (ou spire)



Le sens des lignes de champ est donné par la règle du tire-bouchon avec les doigts (de la main droite)

se refermant sur la paume de la main dans le sens de rotation du courant dans la boucle. Le pouce de la main donne alors le sens des lignes de champ à l'intérieur de la boucle.

FIGURE 4.10 – Champ magnétique produit par un solénoïde



Le sens des lignes de champ est donné par la même règle que pour une boucle de courant.

4.2.4 Le magnétisme dans la matière

Une première constatation expérimentale est que l'on peut casser un aimant permanent un nombre indéfini de fois, le résultat se présentera toujours sous la forme d'un dipôle magnétique. Il est donc impossible, contrairement au cas de l'électricité où on peut séparer les charges positives des négatives, d'isoler un monopôle magnétique. Pratiquement, il est impossible d'avoir dans sa main droite un pôle sud et dans sa main gauche un pôle nord. Cette inexistence de monopôle magnétique est un fait expérimental important de la physique. Et on va voir qu'elle trouve une explication dans l'origine du champ magnétique dans les aimants permanents.

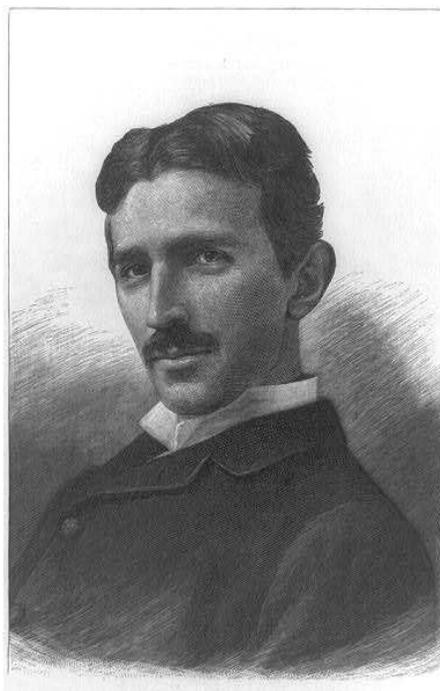
A quoi donc peut-on attribuer le magnétisme des aimants permanents? Nous avons vu que l'origine de l'aimantation se trouve dans la présence d'un courant électrique. Dans la matière, où peut se trouver un tel courant? Pour le comprendre, il faut se rappeler ce qu'est un courant. Par définition, il s'agit d'un dépla-

Nikola Tesla (1856-1943)

Un très grand scientifique passionné par l'électromécanique. L'unité du champ magnétique porte son nom en reconnaissance d'un travail scientifique remarquable. On lui doit le courant polyphasé et de multiples moteurs électriques.

“Lorsque j’ai une idée, je commence tout de suite à l’élaborer dans mon imagination. Je modifie sa construction, je lui apporte des améliorations et je fais marcher l’appareil dans ma tête. Peu importe que je fasse marcher ma turbine dans mon mental ou que je la teste dans mon laboratoire. [...] Cela ne fait aucune différence pour moi ; les résultats sont les mêmes. C’est ainsi que je peux développer et perfectionner rapidement un concept sans toucher à la matière. Lorsque je suis arrivé au point où j’ai intégré dans mon invention tous les perfectionnements que je puisse imaginer et que je n’y vois plus rien qui ne soit parfait, je passe à la concrétisation de ce produit final élaboré dans mon cerveau. [...] Il n’existe pratiquement rien qui ne puisse être calculé ou étudié à l’avance, à partir des théories existantes et des données pratiques. La mise en application d’une idée originelle grossière, telle qu’elle se fait habituellement n’est, pour moi, rien d’autre qu’une perte d’énergie, de temps et d’argent.”

(Tesla, 1919, chap. 1.)



Portrait de Nikola Tesla tiré de Wikipedia¹²

ement (un débit) de charges. Ainsi, on doit trouver des charges qui se déplacent dans la matière. On ne peut que penser aux électrons qui tournent autour des noyaux atomiques, et même sur eux-mêmes (on parle alors de leur spin). Or, si la rotation des électrons sur leur orbite produit bien un champ magnétique, pour un plan et un sens de rotation électronique donné, on trouve toujours un plan de rotation identique avec un sens de rotation opposé. Alors, les deux champs qui en résultent sont opposés et s’annulent. L’origine du champ est donc plutôt à trouver dans la rotation de l’électron sur lui-même. C’est son spin qui produit un petit champ magnétique. Mais, dans de la matière comme de l’aluminium, ces spins s’orientent les uns par rapport aux autres de manière totalement

désordonnée. Ainsi, pour un spin donné, on trouve toujours dans ce cas un autre spin dont le sens de rotation est contraire au premier. Les champs magnétiques de ces deux spins étant alors parfaitement opposés, ils s’annulent. Ainsi, ce type de matière n’est pas magnétique.

Par contre, avec du fer, les spins sont bien alignés les uns par rapport aux autres. Et les petits champs magnétiques de chaque spin sont parallèles et de même sens. Il s’additionnent donc, donnant lieu à un champ magnétique intense (“... pour le fer, deux électrons de chaque atome prennent part à ce mouvement collectif” (Feynman, 1979, p. 225.). “Bien sûr, un seul électron ne crée pas un champ magnétique bien intense, mais un morceau de ma-

tière ordinaire contient des milliards et des milliards d'électrons" (Feynman, 1979, p. 224.)). Bien entendu, nous avons là une propriété spécifique du fer qui est de préserver l'alignement des spin préalablement acquis par l'influence d'un champ magnétique extérieur. Bien entendu aussi, cet alignement n'est pas parfait et il se peut que de petits domaines de la matière (domaines de Weiss) soient différemment alignés par rapport au reste de la matière (ceci par influence des champs magnétiques environnants). Ceci implique des aimants permanents plus ou moins influents. Globalement donc, nous avons affaire à des matières aimantables comme le fer, le cobalt, le nickel et le gadolinium (on les nomme ferromagnétiques) et à des matières non-aimantables comme l'aluminium, le cuivre, etc.

On comprend aussi alors comment désaimanter un aimant permanent. Il faut désordonner les spins des électrons. Pour cela, on peut taper sur l'aimant ou, mieux, le chauffer. Il existe ainsi une température à partir de laquelle l'aimant est totalement désaimanté sous l'effet de l'agitation thermique : on l'appelle le point de Curie.

On peut mieux comprendre maintenant l'origine du magnétisme terrestre. Pour qu'il y ait aimantation, il faut des courants électriques. Il ne s'agit plus ici de courants électroniques, mais vraisemblablement de courants de magma chargé. En effet, une expérience intéressante consiste à faire tourner de l'eau à l'intérieur d'une grosse boule de verre pour simuler la rotation de la Terre et du magma de son noyau extérieur. Il en ressort que la rotation de la Terre induit des colonnes de convection (de la matière en rotation) parallèlement à l'axe de rotation qui pourraient être à l'origine de son magnétisme. Mais cette théorie reste encore à confirmer (Nataf et Sommeria, 2008, chap. 3.).

4.2.5 Application

La connaissance du champ magnétique produit par un solénoïde permet de nombreuses applications. En effet, le champ magnétique produit est fonction du nombre de spires (et du courant les parcourant). Avec beaucoup de spires et un courant important, on produit un champ très intense. Or, un tel solénoïde n'est

en réalité qu'un gros aimant ... qui peut soulever des objets. La force magnétique produite par un tel aimant est en effet assez forte pour que l'on puisse réaliser des "crochets" de grues pour déplacer des voitures usagées dans les décharges, par exemple.

4.3 La loi de Laplace

4.3.1 Définition

Nous avons vu au paragraphe 4.2.3 qu'un courant peut avoir une action sur l'aiguille aimantée d'une boussole. Nous allons maintenant établir une loi qui traduit mathématiquement cette action. Pour cela, considérons la figure 4.11.

En particulier définissons les grandeurs suivantes :

- I est le courant électrique qui passe dans le fil.
- \vec{L} le vecteur dont la direction est donnée par le fil, le sens par celui du courant et la grandeur par la longueur du fil plongée dans le champ magnétique.
- \vec{B} le champ magnétique.
- \vec{F} la force exercée par le champ magnétique sur le fil.

On voit alors clairement sur le dessin qu'il existe une relation vectorielle (le produit vectoriel) entre ces grandeurs. Elle peut s'exprimer par la loi de Laplace :

$$\boxed{\vec{F} = I \cdot \vec{L} \times \vec{B}} \quad (4.1)$$

En effet, le sens des vecteurs de cette relation est compatible avec la règle du tire-bouchon qui s'applique au produit vectoriel.

Ainsi se traduit naturellement (mais c'est non sans effort que les physiciens, sous l'influence du paradigme newtonien de la loi de la gravitation universelle et de celle de Coulomb, l'ont découverte) l'action transversale (perpendiculaire au champ magnétique) du champ magnétique sur un fil parcouru par un courant.

4.3.2 Applications

Les deux applications suivantes sont issues de l'expression de la force de Laplace. Toutes deux se basent

Pierre-Simon Laplace (1749-1827)

Un très grand scientifique autant physicien que mathématicien. Il travailla dans beaucoup d'autres domaines et si on lui doit la loi qui porte son nom, ce n'est essentiellement pas pour cela qu'on le connaissait mais pour son oeuvre dans le domaine des probabilités.

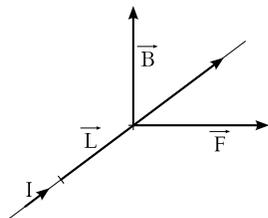
“La nature de cette modification singulière en vertu de laquelle un corps est transporté d'un lieu dans un autre, est et sera toujours inconnue. Elle a été désignée sous le nom de force; on ne peut déterminer que ses effets, et les lois de son action. L'effet d'une force agissante sur un point matériel, est de le mettre en mouvement, si rien ne s'y oppose. La direction de la force, est la droite qu'elle tend à lui faire décrire.”

(Laplace, 1836, Livre III, chap. 1, p 136.)

Portrait de Pierre-Simon Laplace tiré de Wikipedia¹³



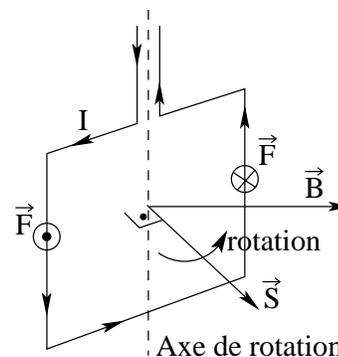
FIGURE 4.11 – La loi de Laplace



sur le comportement d'un cadre parcouru par un courant I et placé dans un champ magnétique (voir figure 4.12).

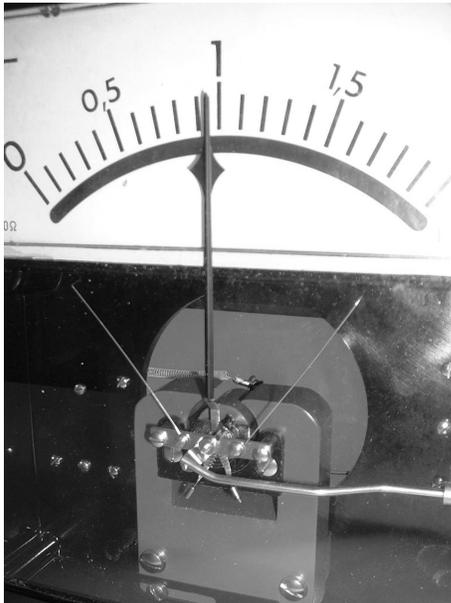
Le cadre est vertical et le champ magnétique horizontal. Le vecteur \vec{S} est perpendiculaire à la surface du cadre. Mais, comme le montrent les deux vecteurs \vec{S} et \vec{B} , le champ magnétique n'est pas perpendiculaire à la surface du cadre. En raison de la présence du courant I , sur chaque côté du cadre s'exerce une force de Laplace. Elle n'est pas représentée sur la figure 4.12 pour les côtés horizontaux parce qu'elle est verticale pour ceux-ci et n'implique aucun mouvement du cadre (les deux forces se compensent). Par contre,

FIGURE 4.12 – Un cadre dans un champ magnétique



pour les côtés verticaux, elle est notée \odot pour une force dont la direction sort de la feuille et \otimes pour une force dont la direction rentre dans la feuille. Ces deux forces forment un couple qui fait tourner le cadre autour de son axe de rotation jusqu'au moment où le vecteur \vec{S} est parallèle et de même sens que \vec{B} . Sous l'effet de l'inertie, il dépasse cette position et les forces le rappellent alors vers celle-ci. Ainsi, le cadre oscille quelques fois autour de cette position d'équilibre et

FIGURE 4.13 – Un galvanomètre

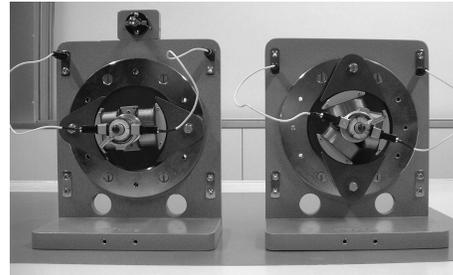


s'y arrête finalement.

Galvanomètre

Un galvanomètre est un appareil destiné à mesurer de très faibles courants. En réalité, il compose tous les appareils électriques à aiguille. Il s'agit en principe d'un cadre identique à celui présenté à la figure 4.12. Au repos, c'est-à-dire quand aucun courant ne parcourt le cadre, aucune force ne s'exerce sur lui. Par contre, lorsqu'un courant le parcourt, le cadre prend une position issue de l'équilibre de deux types forces : le couple de forces d'origine magnétique et une force de rappel qui vient d'un ressort spirale. La force de Laplace étant directement proportionnelle au courant I , plus celui-ci est grand, plus la déviation le sera. Il suffit alors de remplacer la flèche du vecteur \vec{S} par une aiguille et mettre au bout de celle-ci une graduation judicieuse et l'appareil peut servir de galvanomètre (voir figure 4.13).

FIGURE 4.14 – Moteurs électriques



Moteur électrique

Le fonctionnement du moteur électrique repose aussi sur la rotation d'un cadre placé dans un champ magnétique. Il est identique au comportement du galvanomètre à l'exception du fait qu'au moment où, sous l'effet de l'inertie, le cadre passe la position d'équilibre (cadre perpendiculaire au champ magnétique), on inverse le sens du courant. Le cadre ne revient donc pas vers cette position d'équilibre. Les forces magnétiques changent de sens et le cadre continue à tourner pendant un demi-tour de plus. Alors, on change à nouveau le sens du courant, les forces s'inversent et le cadre poursuit sa rotation. L'inversion du sens du courant électrique se fait très simplement à l'aide de balais s'appuyant sur un disque tournant avec le cadre et partagé en deux parties connectées au cadre. Par ailleurs, pour augmenter la force magnétique sur le cadre, on multiplie les spires de celui-ci. C'est pourquoi on voit sur la figure 4.14 des bobines à la place d'un cadre. Enfin, il faut considérer que si le cadre se trouve au départ dans la position d'équilibre, le moteur ne peut se mettre de lui-même en rotation. Il faut alors le pousser brièvement pour lancer sa rotation. Par contre, pour un moteur à trois cadre différemment orientés comme celui de la figure 4.14, le démarrage est automatique puisqu'il y a toujours un cadre qui n'est pas dans la position d'équilibre par rapport au champ magnétique produit par les pièces polaires arrondies autour des cadres.

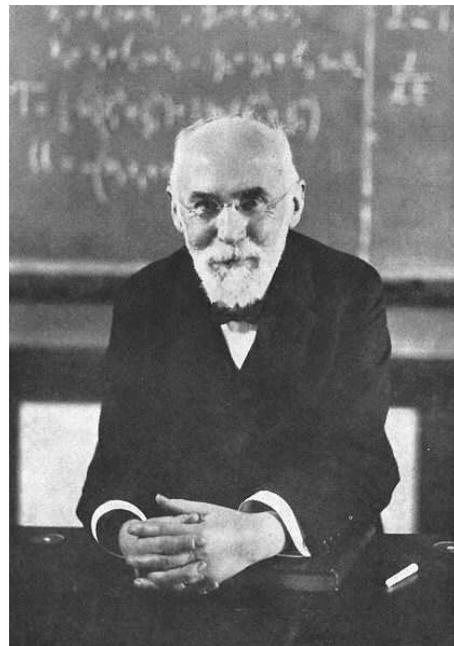
Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928)

Il travailla aux frontières de la relativité restreinte en découvrant, outre la force qui porte son nom, la célèbre transformation de Lorentz.

“Denken wir uns, [...] die Kraftlinien eines homogenen Feldes senkrecht zur Ebene der Zeichnung und zwar nach vorn gerichtet, so wird ein ursprünglich nach oben fliegendes Teilchen eine nach rechts abbiegende Bahn [...] beschreiben, wenn es positive, eine nach links abbiegende dagegen, wenn es negative Ladung hat. Die Geschwindigkeit v bleibt jetzt, da die Kraft fortwährend senkrecht zur Bewegungsrichtung steht, konstant ; infolgedessen bleibt auch die Größe der Kraft ungeändert, sodaß ein Kreis beschrieben wird. Beachtet man, daß die Kraft durch den Ausdruck $e\vec{v} \times \vec{H}$ gegeben wird, wo H die magnetische Feldstärke bedeutet [...]”^b.

(Lorentz, 1904, p 14 et 15.)

Portrait de Hendrik Antoon Lorentz tiré de Wikipedia¹⁴



4.4 La loi de Lorentz

4.4.1 Définition

La loi de Laplace est une loi dite macroscopique, c’est-à-dire faisant intervenir des grandeurs assez facilement mesurables comme le courant I , la longueur L et le champ magnétique B . Cette loi ne permet pas de prévoir le comportement d’un électron isolé placé dans un champ magnétique. Pourtant, une petite modification de celle-ci le permet. En effet, on a :

$$\vec{F} = I \cdot \vec{L} \times \vec{B}$$

Or, par définition du courant électrique, on a aussi formellement (en réalité, il s’agit de variations) :

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

Ainsi, on peut écrire :

$$\begin{aligned} \vec{F} &= \frac{q}{t} \cdot \vec{L} \times \vec{B} \\ &= q \cdot \frac{\vec{L}}{t} \times \vec{B} \\ &= q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \end{aligned}$$

En définitive, la force \vec{F} exercée sur une charge q se déplaçant à la vitesse \vec{v} dans un champ magnétique \vec{B} s’exprime par la **loi de Lorentz** :

$$\boxed{\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}} \quad (4.2)$$

C’est l’expression d’une loi “microscopique” puisqu’elle exprime la force qui s’exerce sur des particules isolées.

b. Voici la traduction en français :

“Représentons-nous [...] les lignes de force d’un champ homogène perpendiculaire au plan du dessin, à savoir, dirigé vers le haut [vers nous]. Alors, une particule se déplaçant à l’origine vers le haut [de la feuille] décrira une trajectoire [...] s’écartant vers la droite si elle a une charge positive, en revanche vers la gauche si elle a une charge négative. Comme la force reste continuellement perpendiculaire à la direction du mouvement, la vitesse v reste

4.4.2 Applications

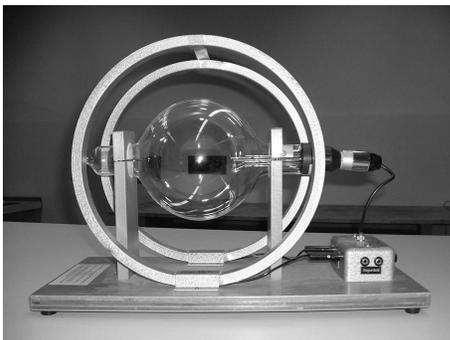
La loi de Lorentz est tout aussi importante que celle de Laplace du point de vue des applications. On en donne ci-dessous trois exemples.

Télévision

Bien que l'on puisse dévier des électrons avec un champ électrique, dans une télévision on le fait avec un champ magnétique. Au départ, on accélère les électrons de manière électrostatique. Puis on les dévie magnétiquement.

Dans le principe, une télévision n'est pas une chose complexe. Mais pratiquement, la réalisation masque beaucoup le principe. C'est pourquoi on va le présenter à travers un dispositif expérimental particulier : il s'agit d'une sphère en verre contenant un gaz rare et un canon à électron (voir figure 4.15).

FIGURE 4.15 – Les bobines de Helmholtz



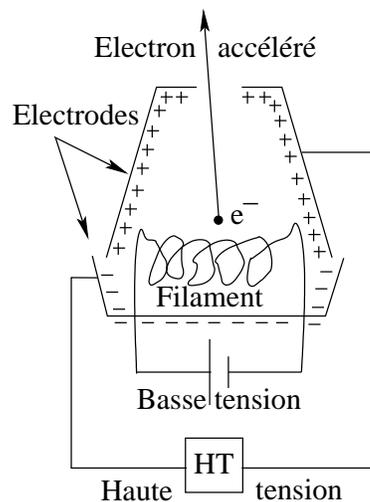
Celle-ci est placée au milieu de deux bobines de Helmholtz (bobines séparées d'une distance égale à leur rayon et au centre desquelles le champ magnétique est particulièrement constant) qui vont réaliser la déviation des électrons. Le fait de faire se déplacer les électrons dans un gaz va permettre de voir leur trajectoire. En effet, en heurtant les atomes du gaz,

alors constante ; en conséquence la grandeur de la force reste aussi inchangée, de sorte qu'un cercle sera décrit. On considère que la force sera donnée par l'expression $e v H$, où H est l'intensité du champ magnétique [...]"

ils font monter un de leurs électrons sur une couche atomique supérieure et celui-ci, en redescendant, va émettre de la lumière.

Le canon à électrons est réalisé par un fil émetteur d'électrons simplement chauffé par une basse tension et deux plaques accélératrices sous haute tension (voir figure 4.16).

FIGURE 4.16 – Le canon à électron

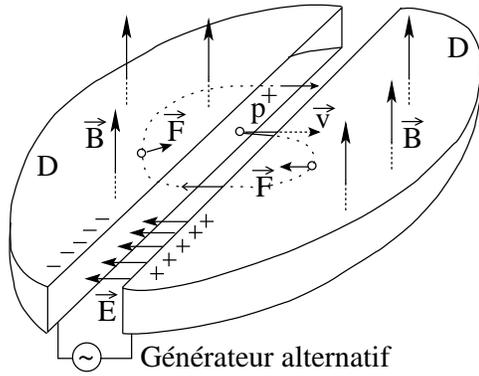


Les électrons émis à basse vitesse par le filament chauffé sont accélérés par le champ électrique créé par les électrodes. Comme l'énergie qu'on leur communique est proportionnelle à la tension ($E = q \cdot U$), une haute tension est appliquée aux électrodes.

Une fois les électrons accélérés, le champ magnétique dans lequel ils sont placés (créé par les deux bobines de Helmholtz qui se trouvent à l'extérieur de la boule de verre) les dévie perpendiculairement à sa direction et à leur vitesse, selon la loi de Lorentz. Avec le dispositif expérimental décrit, on fait tourner les électrons sur une trajectoire circulaire dans le cas où le champ magnétique est parfaitement perpendiculaire à la vitesse. Dans le cas où une composante de la vitesse est parallèle au champ magnétique, la trajectoire est une spirale d'axe parallèle au champ.

Dans le cas d'une télévision, on doit produire deux champs perpendiculaires à l'axe du tube. L'un produit une déviation horizontale et l'autre une dévia-

FIGURE 4.17 – Principe de fonctionnement du cyclotron



tion verticale pour effectuer les balayages horizontaux et verticaux.

Les électrons sont précisément déviés en jouant sur l'intensité du champ magnétique par l'intermédiaire du courant électrique dans les bobines. Ils sont déviés sur de minuscules pastilles phosphorescentes de trois couleurs (rouges, vertes et bleues : RVB) qui, bombardés par ceux-ci, s'illuminent. Si le balayage est assez rapide pour que l'œil ne s'en aperçoive pas, on peut former une image. Il faut bien se rendre compte de la complexité de l'électronique qui gère le courant dans les bobines, mais le principe physique de déviation est assez simple.

Accélérateur de particules : le cyclotron

En médecine, par exemple, on a parfois besoin, pour soigner des cancers, d'irradier les tumeurs. Pour cela on peut utiliser des particules comme des protons. Encore faut-il pouvoir les lancer à grande vitesse. Le cyclotron peut être utilisé pour cela.

Son principe de fonctionnement est le suivant. On place deux boîtes en forme de demi-cylindre (des D) aplati, vide à l'intérieur, face à face (voir figure 4.17).

Ces deux D sont chargés d'un côté positivement et de l'autre négativement par un générateur alternatif. On place aussi ces deux D dans un champ magnétique, pour l'exemple donné, dirigé vers le haut. L'accélération des particules (qui doivent être chargées) se fait alors en les plaçant entre les deux D.

Là elles se trouvent dans le champ électrique créé par les charges du générateur alternatif. Elles sont alors accélérées en ligne droite pendant tout le temps qu'elle se trouvent entre les D. En effet, dès qu'elles entrent dans les D, ceux-ci faisant office de cage de Faraday (voir paragraphe 2.3.5), la force électrique accélératrice cesse. Par contre, un champ magnétique perpendiculaire à la vitesse initiale étant présent, il fait tourner les charges à l'intérieur des D (sans augmenter leur vitesse) sur une trajectoire circulaire qui les ramène entre les D. En effet, la force de Lorentz s'exerce. Or, cette force est toujours perpendiculaire à la vitesse. Si bien qu'il n'y a pas augmentation de la vitesse des particules, mais seulement déviation de celles-ci. De plus, pour une force toujours perpendiculaire à la vitesse, on montre que la trajectoire est un cercle. Si le champ électrique reste tel qu'il était au départ, les particules sont freinées et tout s'arrête. Il est donc nécessaire d'inverser le champ en inversant les charges sur les D. C'est pourquoi le générateur est alternatif (comme on montre à l'annexe H que les particules font toutes leurs demi-tours à la même fréquence, cela ne pose pas de problèmes particuliers). On inverse donc le champ juste avant que les particules arrivent entre les deux D. Alors, en passant entre eux, elles sont encore accélérées. Puis elles pénètrent dans l'autre D avec une vitesse plus grande qu'auparavant. Là, l'action électrique cesse et la force magnétique dévie à nouveau les particules sur une trajectoire circulaire. Mais, comme la vitesse initiale a augmenté, le rayon de la trajectoire est plus grand que pour le premier demi-tour (bien que le temps de rotation reste le même). Ainsi les particules sont accélérées après chaque demi-tour et le rayon de leur trajectoire augmente. Il suffit alors de les laisser tourner assez longtemps pour qu'elles atteignent une trajectoire dont le diamètre est égal à celui du cyclotron pour pouvoir alors les laisser sortir et généralement les envoyer sur une cible.

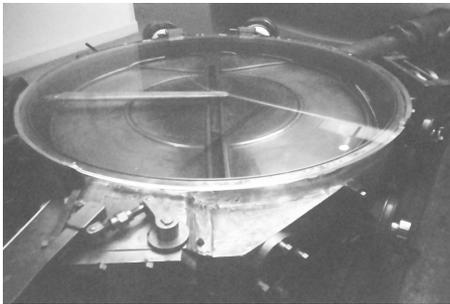
La figure 4.18 est une photo du cyclotron exposé aux Arts et Métiers de Paris.

Remarquez la taille tout à fait raisonnable de l'appareil, malgré le gros électro-aimant (gros O en arrière plan à droite). Les deux D sont à l'intérieur du disque central. Ils sont visible sur la figure 4.19, qui est un agrandissement de la partie centrale de la fi-

FIGURE 4.18 – Le cyclotron des Arts et Métiers



FIGURE 4.19 – Les deux D d'un cyclotron



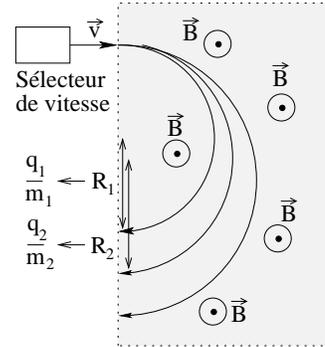
gure 4.18.

Le tout est mis sous vide pour éviter les collisions des particules avec celles de l'air. C'est pourquoi on voit des "tuyaux" qui sortent du cyclotron. La sortie des particules se faisait par la partie claire au centre de l'image et dans la direction du plan de la feuille, vers la gauche.

Spectrographe de masse

L'objectif est de déterminer le rapport $\frac{q}{m}$ d'un ensemble de particules que l'on ne connaît pas. Cela permet ensuite de déterminer le type de particules auxquelles on a affaire. Le principe est encore une fois assez simple. Et la réalisation complexe. On utilise un sélecteur de vitesse (voir exercice 61) pour amener toutes les particules à la même vitesse. Puis

FIGURE 4.20 – Spectrographe de masse



on les envoie dans un champ magnétique perpendiculaire à cette vitesse. Comme le rayon de la trajectoire qu'ils suivent alors est fonction du rapport $\frac{q}{m}$ par l'équation (voir annexe H)

$$r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B} \tag{4.3}$$

on peut déterminer celui-ci en plaçant une plaque photographique après un demi-tour de rotation des particules et en mesurant de cette manière le rayon de la trajectoire (voir figure 4.20).

RÉSUMÉ DES GRANDEURS ET UNITÉS

| Grandeur | Définition | Unité |
|-----------------------|---------------------------|---------|
| Charge | q | C ou Ah |
| Courant | $I = \Delta q / \Delta t$ | A = C/s |
| Champ magnétique | B | T |
| Champ magn. terrestre | B_T | T |

Concepts importants

Pôles magnétiques nord et sud

Champ magnétique et structure interne de la Terre

Origine du magnétisme : le courant électrique

Magnétisme dans la matière

Lois

$$\vec{F} = I \cdot \vec{L} \times \vec{B} \quad \text{loi de Laplace} \quad (4.4)$$

$$\Rightarrow F = I \cdot L \cdot B \cdot \sin(\alpha) \quad (4.5)$$

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad \text{loi de Lorentz} \quad (4.6)$$

$$\Rightarrow F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin(\alpha) \quad (4.7)$$

Applications :

Télévision, galvanomètre, moteur électrique, accélérateur de particules, spectrographe de masse.

FIGURE 4.21 – Résumé de magnétisme

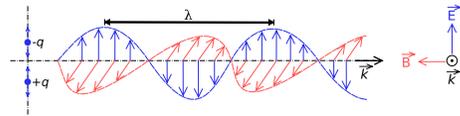
Électromagnétisme

Le propos de ce chapitre est de présenter une courte introduction aux ondes électromagnétiques. Il commence par faire le lien entre le chapitre sur l'électricité et celui sur le magnétisme pour expliquer très succinctement la nature électromagnétique de la lumière. Puis il présente le spectre des ondes électromagnétiques pour faire ressortir des applications importantes. Car les champs électriques et magnétiques sont des notions si abstraites que bien souvent on n'imagine pas la multitude des applications auxquelles elles donnent lieu et que nous utilisons tout les jours sans le savoir.

5.1 Nature de la lumière

Il n'est pas question ici de présenter la nature ondulatoire de la lumière, pas plus que la théorie électromagnétique, dite de Maxwell, qui décrit les propriétés électromagnétiques de la lumière. Cela dépasse très largement le cadre de ce cours. Mais on peut facilement s'imaginer la lumière sous la forme d'une onde à l'instar des vagues sur l'eau. Si les ondes aquatiques, comme les vagues, nécessitent un support pour se propager, en l'occurrence de l'eau, les ondes lumineuses n'en ont pas besoin. Dans le cas de l'eau, on comprend bien que ce sont les molécules d'eau qui oscillent et permettent la propagation de l'onde aquatique. Dans le cas de la lumière, il se produit deux oscillations. Celle du champ électrique et, perpendiculairement à lui, celle du champ magnétique. On peut donc se re-

FIGURE 5.1 – Onde électromagnétique
Composé de deux champs, électrique et magnétique¹⁵



présenter la lumière par l'oscillation simultanée de ces deux champs, comme présenté à la figure 5.1. La raison pour laquelle le champ électrique est perpendiculaire au champ magnétique et celle pour laquelle ils sont les deux perpendiculaires à la direction de déplacement de l'onde lumineuse, représentée par le vecteur \vec{k} , dépassent le cadre de ce cours.

Cependant, on constate l'analogie de forme sur la figure 5.1 entre l'oscillation de chacun des champs et celle d'une vague. En réalité, cette oscillation est complexe. En effet, en un instant donné, l'image de chacun des champs (magnétique et électrique) est celle de la figure 5.1 dans l'espace. On peut donc définir la distance entre deux maximums de l'un ou l'autre des champs comme étant ce qu'on appelle sa longueur d'onde λ ($[\lambda] = \text{m}$). Celle-ci, comme nous le verrons par la suite, est une caractéristique de l'onde électromagnétique. Mais aussi, en un point donné, le champ (magnétique ou électrique) augmente, diminue, s'inverse, augmente, diminue et s'inverse à nouveau au cours du temps. Il y a donc une variation dans le temps de chacun des champs pour laquelle on

peut définir un intervalle de temps qui correspond au temps que met l'un ou l'autre des champs pour revenir au maximum de son intensité, ce qu'on appelle sa période T ($[T] = \text{s}$). La variation de chacun des champs se fait donc à la fois dans l'espace et dans le temps. A chacune de ces variations correspond une grandeur caractéristique : la longueur d'onde λ pour la variation spatiale et la période T pour la variation temporelle. A ceci près que la période est très peu utilisée pour décrire les ondes électromagnétiques. On utilise de préférence sa fréquence ν qui est l'inverse de la période et se mesure en Hertz (Hz) :

$$\nu = \frac{1}{T} \text{ et } [\nu] = \frac{1}{[T]} = \frac{1}{\text{s}} = \text{Hz} \quad (5.1)$$

De plus, on s'imagine que ces deux grandeurs sont liées l'une à l'autre. En effet, le champ d'une onde de longueur d'onde petite met un temps très petit à passer d'un maximum à l'autre. Sa fréquence est donc grande. Ainsi, une onde de courte longueur d'onde a une grande fréquence et inversement un onde de grande longueur d'onde a une basse fréquence. La grandeur qui lie la fréquence à la longueur d'onde est, dans le vide, la vitesse de la lumière $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (5.2)$$

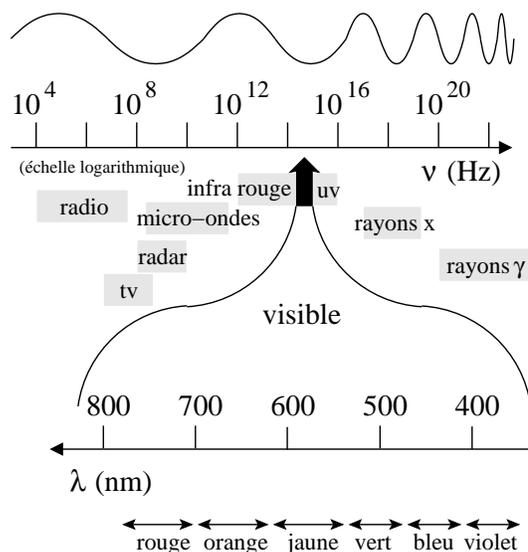
Cette relation permet de définir univoquement une onde électromagnétique soit par sa longueur d'onde, soit par sa fréquence. L'usage veut que pour les ondes lumineuses la longueur d'onde soit utilisée et que pour les autres ondes électromagnétiques ce soit la fréquence qui est utilisée, comme le montre la figure 5.2.

5.2 Applications

Elles sont évidemment si nombreuses que seules les plus parlantes seront abordées. Avant de le faire en parcourant le spectre des ondes électromagnétiques (abrégées ondes *em*), quelques remarques s'imposent.

— Insistons sur le fait qu'on peut parcourir le spectre en fréquence ν ou en longueur d'onde λ . On vient de voir que pour les ondes invisibles, dites parfois électromagnétiques, on utilise généralement la fréquence, alors que pour

FIGURE 5.2 – Le spectre des ondes électromagnétiques



les ondes, dites optiques (infrarouge, visible et ultraviolet), on utilise plutôt la longueur d'onde. Mais attention, les ondes optiques, sont de même nature que les ondes électromagnétiques. Elles sont toutes deux formées d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Elles méritent donc toutes deux le terme d'électromagnétiques. D'un autre côté, si on considère que la lumière est une onde électromagnétique, on peut aussi dire que tous les types d'ondes électromagnétiques sont de la lumière. On dira alors qu'il existe de la lumière visible et de la lumière invisible, ce qui peut sembler paradoxal.

Pour les rayons X et γ , une autre habitude est de les classer en terme d'énergie E . La relation :

$$E = h \cdot \nu \text{ ou } E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (5.3)$$

où ν est la fréquence, λ la longueur d'onde, c la vitesse de la lumière et où la constante de Planck $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, permet de déterminer l'énergie associée à une certaine fréquence ou longueur d'onde.

Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894)

Il découvrit au tournant du XIX^e-XX^e siècle les ondes radio, dites hertziennes, qui avaient été prédites par James Clerk Maxwell.

“Les ondes électrodynamiques dans l’air se réfléchissent sur les parois conductrices et, à angle d’incidence nul, les ondes réfléchies interfèrent avec les ondes incidentes et génèrent des ondes stationnaires dans l’air. [...] et je crois que la nature ondulatoire du son, dans l’espace libre, ne saute pas aussi clairement aux yeux que celle de cette propagation électrodynamique.” A Helmholtz.

(Boudenot, 2005, p 104 et 105.)



Portrait de Heinrich Rudolf Hertz tiré de Wikipedia¹⁶

Les unités alors utilisées sont couramment des multiples de l’électron-volt $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ J}$.

- L’une de leurs propriétés est leur capacité à se diffracter autour des obstacles. Cela signifie qu’elles sont capables dans une certaine mesure de contourner les obstacles. C’est leur nature ondulatoire qui le leur permet. Cependant, plus la longueur d’onde est faible, moins la diffraction est importante. Plus précisément, la diffraction n’est importante qu’autour d’objets dont la taille est de l’ordre de la longueur d’onde ou inférieure.
- La propagation des ondes électromagnétiques (de longueur d’onde supérieure à 10 m) se fait selon deux modes :

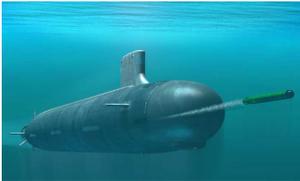
en ligne directe , c’est-à-dire en ligne droite entre l’émetteur et le récepteur. Cependant, il peut y avoir aussi de la diffraction.

par la ionosphère , c’est-à-dire guidée suivant des courbes par la réflexion sur la ionosphère. L’émetteur et le récepteur ne sont alors pas en ligne directe.

- Enfin, il faut savoir que le débit d’information permis par une onde électromagnétique est d’autant plus important que sa fréquence est élevée, c’est-à-dire sa longueur d’onde petite.

Voyons maintenant, en parcourant le spectre électromagnétique à travers le tableau 5.1, quelques exemples d’utilisation intéressants (Le contenu de ce tableau provient dans une grande mesure de l’excellent ouvrage (Boudenot, 2005, chapitre 5)).

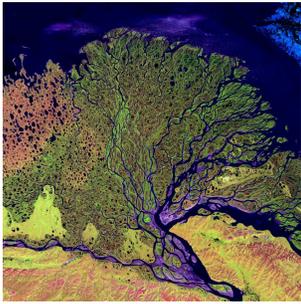
TABLE 5.1 – Le spectre des applications électromagnétiques

| Fréq. ν | Long. onde λ | Description |
|---|----------------------|--|
| 30 – 300 Hz | 10 – 1 Mm | <p>ELF : Extremely Low Frequency</p> <p>L'eau de mer est bonne conductrice. Les ondes en s'y réfléchissent bien. Néanmoins, une légère propagation sous l'eau ($\sim 100 m$) est possible avec les ELF. Il faut des antennes très longues de plusieurs dizaines de km. Le rendement est très faible.</p> <p>L'application principale est la communication avec les sous-marins.</p> |
|  | 17 | |
| 0,3 – 3 kHz | 1 – 0,1 Mm | <p>ULF : Ultra Low Frequency</p> <p>On peut signaler l'étude des orages magnétiques qui se déroulent dans la magnétosphère (le 13 mars 1989, six millions de québécois sont sans électricité pendant neuf heures suite à un orage magnétique) ainsi que celle des tremblements de terre qui produisent de telles ondes.</p> |
| 3 – 30 kHz | 100 – 10 km | <p>VLF : Very Low Frequency</p> <p>Outre sous-marins et magnétosphère comme précédemment, on peut signaler la radionavigation avec la transmission de l'heure pour la détermination de la longitude.</p> |
|  | | |
| 30 – 300 kHz | 10 – 1 km | <p>LF : Low Frequency ; ondes kilométriques.</p> <p>Diffusion de signaux horaires et radio AM (Modulation d'Amplitude) comme</p> <ul style="list-style-type: none"> – France Inter ($\nu = 162 kHz$; $\lambda = 1852 m$) – RTL ($\nu = 234 kHz$; $\lambda = 1282 m$) <p>Terminologie pour la modulation d'amplitude (AM) :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Ondes Longues (OL) : 153 – 279 kHz – Ondes Moyennes (OM) : 531 – 1620 kHz – Ondes Courtes (OC) : 2310 – 25'820 kHz |
|  | | |
| 0,3 – 3 MHz | 1 – 0,1 km | <p>MF : Medium Frequency ; ondes hectométriques.</p> <p>Portée plus courte que les kilométriques, elles servent à la radio AM.</p> |
| 3 – 30 MHz | 100 – 10 m | <p>HF : High Frequency ; ondes décamétriques.</p> <p>De portée faible. Cependant une propagation longue ionosphérique est possible.</p> <p>C'est le domaine des radioamateurs.</p> |
|  | 18 | |

suite sur la prochaine page

| Fréq. ν | Long. onde λ | Description |
|---|----------------------|--|
| 30 – 300 MHz | 10 – 1 m | <p>VHF : Very High Frequency ; ondes métriques. La propagation est directionnelle, mais il peut y avoir contournement de petits obstacles ($\sim 1 m$). Ces ondes traversent sans difficulté les nuages. C'est le domaine de la télévision et des radios en modulation de fréquence (FM). C'est aussi celui des radars.</p> <p>Terminologie pour la VHF :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Bande I : 47 – 68 MHz Télévision – Bande II : 87,5 – 108 MHz Radio FM – Bande III : 174 – 221 MHz TV et radio numériques |
|  | 19 | |
| 0,3 – 3 GHz | 1 – 0,1 m | <p>UHF : Ultra High Frequency ; ondes décimétriques La propagation se fait en ligne droite, à vue et sans obstacles. Les nuages n'en sont pas un. On trouve beaucoup d'applications connues.</p> <p>La télévision entre 470 et 862 MHz.</p> <p>La téléphonie GSM : Global System for Mobile communications avec émission (890 – 915 MHz) et réception (935 – 960 MHz) ou DCS : Digital Cellular System.</p> <p>Le GPS ou Global Position System, avec 26 satellites à 20'000 km de la surface de la Terre, entre 1,2 et 1,5 GHz.</p> <p>Le Wifi ou Wireless Fidelity, pour les communications sans fil des ordinateurs sur $\sim 2,4 GHz$.</p> <p>Les fours à micro-ondes à 2450 MHz et les radars.</p> |
|  | 20 | |
| 3 – 30 GHz | 10 – 1 cm | <p>SHF : Super High Frequency ; ondes centimétriques</p> <p>La propagation se fait en ligne droite. Ces ondes sont opaques à la pluie. Mais le débit est très grand. Les applications sont la navigation, l'altimétrie radio, les liaisons avec les satellites, les radars météo, la radioastronomie.</p> |
|  | 21 | |
| 30 – 300 GHz | 10 – 1 mm | <p>EHF : Extremely High Frequency ; ondes millimétriques Comme précédemment avec des radars météo pour la pluie, la neige, les nuages.</p> |
| 0,1 – 10 THz | 3 mm – 30 μm | <p>THZ : terahertz Pénètre sur $\sim 1 mm$ dans la peau. La recherche tente la détection des cancers.</p> |

suite sur la prochaine page

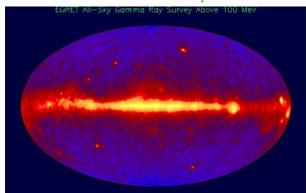
| Fréq. ν | Long. onde λ | Description |
|---|-------------------------|---|
| Domaine Optique | | |
| Infrarouge | | |
| 6 – 20 THz | 50 – 16 μm | VLWIR : Very Long Wave Infrared Atmosphère opaque. Domaine de l'astronomie spatiale. |
| 20 – 100 THz | 16 – 3 μm | L ou MWIR : Long ou Medium Wave Infrared |
|  | | Atmosphère transparente. Jumelles infrarouge, astronomie. Ci-contre la nébuleuse de l'Hélice (télescope spatial Spitzer de la NASA). Il s'agit de fausses couleurs : le bleu correspond aux longueurs d'ondes de 3,6 à 4,5 microns, le vert de 5,8 à 8 microns, et le rouge aux longueurs d'ondes de 24 microns. |
| 100 – 400 THz | 3 – 0,8 μm | NWIR : Near Wave Infrared |
|  | | Atmosphère transparente. Observations de la Terre depuis l'espace : ici le delta du fleuve Lena (Sibérie) en fausses couleurs rouge, infrarouge proche et lointain. |
| Visible | | |
| 400 – 750 THz | 0,8 – 0,4 μm | Lumière visible |
|  | | Détection oculaire, couleurs. Les exemples ne manquent pas : photographie argentique, numérique (capteurs CCD), cinématographie, caméra numérique, écrans de tv, d'ordinateur, de téléphones, diodes, laser, ... |
| UltraViolet | | |
| 750 – 952 THz | 4000 – 3150 Å | UVA : Ultra Violet A |
|  | | Les abeilles sont sensibles aux ultraviolets. Les ultraviolets A sont responsables du bronzage et des coups de soleil. Ils favorisent le vieillissement de la peau et l'apparition des rides. Signalons encore que : si $\nu > 3200 \text{ \AA}$ \Rightarrow verre transparent. si $\nu < 3200 \text{ \AA}$ \Rightarrow verre opaque. |

suite sur la prochaine page

| Fréq. ν | Long. onde λ | Description |
|-------------------------------|-----------------------------|--|
| $0,952 - 1 \text{ PHz}$ | $3150 - 2800 \text{ \AA}$ | <p>UVB : Ultra Violet B Les ultraviolets B sont responsables des coups de soleil profonds et de cancers de la peau.</p> <p>Signalons encore que : si $\nu > 2950 \text{ \AA}$ \Rightarrow atmosphère transparente. si $\nu < 2950 \text{ \AA}$ \Rightarrow atmosphère opaque.</p> |
| $1 - 75 \text{ PHz}$ | $2800 - 40 \text{ \AA}$ | <p>UVC : Ultra Violet C Il n'atteignent pas la surface de la Terre, car ils sont arrêtés par l'atmosphère. Ils sont cependant très nocifs et peuvent être utilisés pour la stérilisation de certains appareils en biologie et en médecine. Ils sont aussi utilisés en astronomie spatiale.</p> |
| Fin du domaine optique | | |
| $3 - 100 \text{ keV}$ | $40 - 0,1 \text{ \AA}$ | <p>Rayons X</p> <p>Astronomie, médecine.</p> <p>Ci-contre, la galaxie Messier 82. Il s'agit d'une image composite. Les rayons X apparaissent bleu, La lumière infrarouge apparaît rouge, La lumière visible émise par l'hydrogène et enregistrée par Hubble apparaît orange et la lumière visible à courte longueur d'onde (bleu-violet) apparaît en jaune-vert.</p> |
| $0,1 - 100 \text{ MeV}$ | $0,1 - 10^{-4} \text{ \AA}$ | <p>Rayons γ</p> <p>Astronomie. Ci-contre une carte du ciel aux rayons $\gamma > 100 \text{ MeV}$.</p> |



26



27

Annexe **A**

Unités du Système international (SI)

A.1 Introduction

Le Système international d'unités (SI) a sa raison d'être non pas dans l'uniformisation, qui n'a pas de sens véritable puisqu'à chaque type de problème un système d'unités adéquat doit être choisi pour simplifier la représentation numérique, mais dans la sim-

plification des calculs. En effet, tous les calculs effectués dans ce système sont prévus (au niveau des constantes utilisées) pour donner des résultats dont les unités restent dans ce système.

A.2 Les unités choisies

| Grandeur | Symbole | Nom unité | Symbole | Unités SI |
|-----------------------|---------|-----------|----------|------------------|
| Température | T | kelvin | K | - |
| Quantité de matière | n | mole | mol | - |
| Courant électrique | I | ampère | A | - |
| Fréquence | f | hertz | Hz | s^{-1} |
| Force | F | newton | N | $kg \cdot m/s^2$ |
| Énergie, travail | E, A | joule | J | $N \cdot m$ |
| Puissance | P | watt | W | J/s |
| Charge électrique | q | coulomb | C | $A \cdot s$ |
| Tension électrique | U | volt | V | W/s |
| Résistance électrique | R | ohm | Ω | $V \cdot A$ |
| Champ électrique | E | - | - | N/C ou V/m |
| Champ magnétique | B | tesla | T | - |

TABLE A.1 – Les unités du Système international

A.3 Exemple

Imaginons une grandeur issue d'un calcul faisant intervenir les deux grandeurs suivantes : une résistance R et un courant I . Si ce calcul se fait à partir de ces deux grandeurs exprimées dans les unités du Système international, dans le cas présent des ohms Ω pour la résistance et des ampères A pour le courant, alors le résultat est forcément exprimé dans les unités du système international. Comme ici ce résultat serait une tension, ces unités seraient des volts V .

A.4 Conversions

Les unités de la table A.2 sont utiles :

| Grandeur | équivalent SI |
|---------------------------------|--------------------------|
| Longueur | |
| 1 Å (angström) | = $1 \cdot 10^{-10}$ m |
| 1 μ (micron) | = $1 \cdot 10^{-6}$ m |
| 1 in (pouce) | = $2,54 \cdot 10^{-2}$ m |
| 1 ft (pied) = 12 in | = 0,3048 m |
| Volume | |
| 1 l (litre) = 1 dm ³ | = $1 \cdot 10^{-3}$ m |
| Énergie | |
| 1 cal (calorie) | = 4,186 J |
| 1 kWh | = $3,6 \cdot 10^6$ J |
| Puissance | |
| 1 CV (cheval-vapeur) | = 736 W |
| Température | |
| 0 °C | = 273,15 K |
| Champ magnétique | |
| 1 G (Gauss) | = $1 \cdot 10^{-4}$ T |

TABLE A.2 – Conversions d'unités

A.5 Multiples et sous-multiples

On trouvera dans la table A.3 les principales notations pour les multiples et les sous-multiples. Ces notations sont bien évidemment liées à la notation scientifique (voir paragraphe A.6). Elle sont aussi liées à

un autre type de notation, dite notation d'ingénieur, qu'il faut mentionner au moins une fois. En effet, si cette notation est somme toute relativement peu utilisée hors des cercles d'ingénieurs, elle est assez souvent présente sur les machines à calculer. Pour qu'elle ne pose pas de problèmes il est donc plus nécessaire de savoir ne pas l'activer que de savoir l'utiliser. En fait, c'est une notation scientifique, mais par facteurs d'exposant de 10 multiple de 3. Ainsi, par exemple, les mètres (10^0) et les millimètres (10^{-3}) sont utilisés, mais pas les centimètres (10^{-2}). Pour transformer 3 cm en notation d'ingénieur, on écrira $30 \cdot 10^{-3}$ m, alors qu'en notation scientifique on préférerait $3 \cdot 10^{-2}$ m, bien que $30 \cdot 10^{-3}$ m soit aussi possible. Ainsi, la notation d'ingénieur est aussi une notation scientifique, mais pas l'inverse.

| Préfixe | Symbole | Facteur |
|---------|---------|------------|
| peta | P | 10^{15} |
| téra | T | 10^{12} |
| giga | G | 10^9 |
| méga | M | 10^6 |
| kilo | k | 10^3 |
| hecto | h | 10^2 |
| déca | da | 10^1 |
| - | - | - |
| déci | d | 10^{-1} |
| centi | c | 10^{-2} |
| milli | m | 10^{-3} |
| micro | μ | 10^{-6} |
| nano | n | 10^{-9} |
| pico | p | 10^{-12} |
| femto | f | 10^{-15} |

TABLE A.3 – Multiples et sous-multiples

A.6 Notation scientifique

A ne pas confondre avec la notation d'ingénieur (par puissances de 10^3), la notation scientifique : $a \cdot 10^x$, où x est un nombre entier positif, négatif ou nul et a un nombre réel, peut être utilisée sur une machine à calculer à l'aide de la touche EXP ou EE.

Notez alors que l'affichage peut donner par exemple : 5E2 pour $5 \cdot 10^2$ ou même 5^2 , sans que le 10 ne soit marqué explicitement.

Remarquons encore les règles mathématiques très utiles suivantes (voir annexe I) :

$$10^a \cdot 10^b = 10^{a+b} \text{ et } \frac{1}{10^a} = 10^{-a}$$

A.7 Valeurs importantes

Enfin, la table A.4 donne quelques valeurs importantes en électricité et magnétisme.

| Grandeur | Valeur |
|----------|---|
| | Vitesse de la lumière |
| c | $= 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ |
| | Constante de la gravitation universelle |
| G | $= 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ |
| | Constante de la loi de Coulomb |
| k | $= 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$ |
| | Charge élémentaire |
| e | $= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ |
| | Masse de l'électron |
| m_e | $= 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ |
| | Masse du proton |
| m_p | $= 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ |
| | Masse du neutron |
| m_n | $= 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ |
| | Comp. horiz. champ magn. terrestre |
| B_h | $= 21,954 \cdot 10^{-6} \text{ T}$ |

TABLE A.4 – Valeurs importantes

Petite histoire de l'électricité

B.1 Introduction

L'histoire de l'électrocinétique est intéressante à plusieurs titres.

Elle permet de bien voir que les concepts utilisés en électricité et la représentation que nous nous faisons aujourd'hui de la "matière électrisée" ne sont pas nés spontanément, mais, si l'on peut dire, ont été enfantés graduellement dans le doute, l'erreur, la discussion et surtout l'expérimentation. Elle permet d'entrevoir aussi le formidable esprit de collaboration entre les savants, qui se disputent certes les découvertes, mais communiquent de plus en plus pour progresser dans la compréhension des phénomènes naturels.

Elle permet aussi de se rendre compte de l'impact des recherches scientifiques sur la population, dont on relève la demande croissante d'explication des phénomènes de la nature auprès des scientifiques. La science devient une culture utilisée par l'imaginaire collectif pour expliquer le monde.

B.2 Le galvanisme

En préambule, il est nécessaire de rappeler

« ... qu'en 1800, l'électricité "ordinaire" était celle des étincelles, des commotions qu'on éprouve lorsqu'on touche les deux pôles d'une batterie [ou ce qui en tenait lieu : la bouteille de Leyde, un "accumulateur" de charges], des décharges d'une

manière générale. C'était donc un phénomène par essence discontinu, bref et souvent violent. Ce caractère de violence est d'ailleurs pour Haiy [minéralogiste] une différence de plus entre électricité et magnétisme :

« ... l'électricité se manifeste aux yeux par des jets de lumière, par de bruyantes étincelles ; le magnétisme agit paisiblement et en silence » [(1821)].

». (Blondel, 1982, p. 19.)

« Le XVIII^e siècle [...] connaissait déjà les courants électriques et certains de leurs effets : brèves décharges fondant des fils de métal, étincelles illuminant l'air, amorçant des combustions et reproduisant en petit les effets de la foudre, effets continus d'une machine statique. C'est ce qu'on appelait le conflit des deux électricités, ou, plus brièvement, le conflit électrique. »

(Bauer, 1949, p. 67.)

Il faut aussi souligner qu'au XVIII^e siècle l'animal n'est vu que comme une machine dont la théorie ne fait appel qu'à la mécanique (c'est la théorie de l'homme machine).

Or, en 1780, Luigi Galvani, professeur d'anatomie, fait une découverte importante.

« Ayant disséqué et préparé une grenouille, je la posai sur la table où se trou-

vait à quelque distance une machine électrique. Il arriva par hasard qu'un de mes assistants toucha de la pointe de son scalpel le nerf crural interne de la grenouille : aussitôt les muscles des membres furent agités de convulsions violentes ». Un autre assistant « crut avoir noté qu'au même instant une étincelle avait jailli du conducteur de la machine. J'étais moi-même alors occupé à tout autre chose, mais lorsqu'il eut attiré mon attention sur ce fait, je désirai beaucoup tenter l'expérience moi-même et en découvrir le principe caché. »

(ent, 1961, p. 204.)

« Un jour d'orage, il constata que l'électricité atmosphérique pouvait produire les mêmes effets que sa machine. Par temps calme aucun phénomène ne fut observable jusqu'au jour où, ayant fixé dans la moëlle épinière d'une grenouille un crochet de cuivre, il referma le circuit en suspendant ce crochet à un grillage en fer [la grenouille le touchant aussi] : les spasmes réapparurent au même instant.

Galvani attribua d'abord ces effets assez bien reproductibles aux variations de l'état électrique de l'atmosphère

« ... car il est aisé, quand on fait des expériences, de se tromper et d'imaginer que l'on voit ce que l'on souhaite voir.

Mais je pris l'animal dans une chambre fermée, le mis sur une plaque de fer ; et, quand je touchai la plaque avec le crochet de cuivre fixé dans la moëlle, je vis les mêmes contractions spasmodiques qu'auparavant. J'essayai d'autres métaux avec le même résultat »

plus ou moins violent. Avec les non-conducteurs

« ... rien ne se produisit. C'était assez surprenant et me

conduisit à soupçonner que l'électricité était inhérente à l'animal lui-même, soupçon qui fut confirmé par l'observation qu'une sorte de circuit nerveux subtil [...] se ferme des nerfs aux muscles quand les contractions se produisent. »

» (Bauer, 1949, p 9.)

La contraction d'un muscle par décharge électrique dans le nerf correspondant n'avait rien pour étonner Galvani. En effet, les décharges des machines électrostatiques de l'époque provoquaient des contractions musculaires. Ce qui l'étonna c'est, d'une part, la contraction par simple toucher avec le scalpel lors de décharges électriques extérieures (machine électrostatique, foudre) et, d'autre part, en l'absence de conditions extérieures, la présence de décharge par simple formation d'un circuit nerf-muscle-crochet de cuivre-plaque de fer.

Le premier de ces effets ne fut expliqué qu'en 1888 par la découverte des ondes dites hertziennes (en hommage à leur découvreur : Hertz), des ondes électromagnétiques (comme celles de la télévision et de la radio) qui peuvent être produites par des décharges. La cuisse de grenouille agit alors comme un récepteur muni d'une antenne, le scalpel.

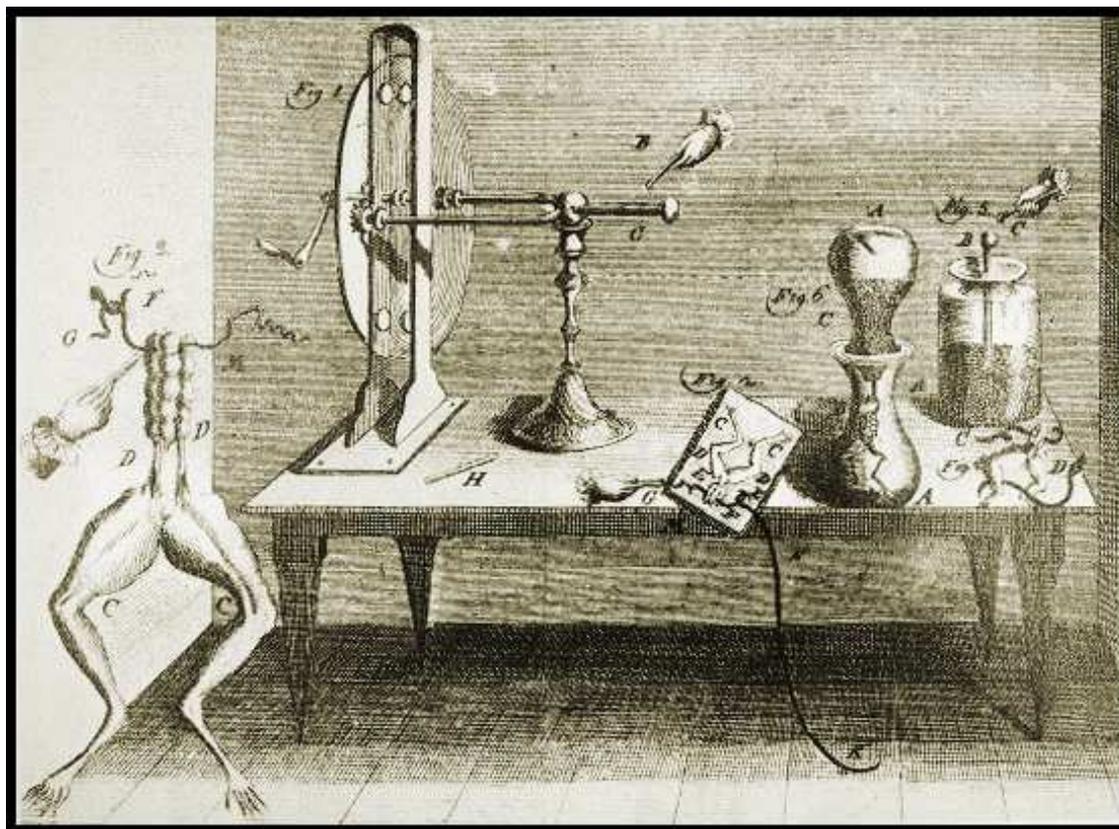
Le second de ces effets, s'il ne fut vraiment compris qu'avec la découverte de l'électron (en 1891), eut des conséquences immédiates avec la découverte de la pile électrique. En effet, l'association cuivre-élément humide-fer constitue une telle pile.

Mais Galvani ne chercha pas l'explication dans les métaux eux-mêmes. En bon anatomiste qu'il était, il s'imagina avoir

« ... découvert une sorte "d'électricité animale" existant dans le tissu animal et qui se libérait au contact des métaux. »

(ent, 1979, p. 74.)

En un sens, il fut un précurseur de l'électrophysiologie (1870) et toute sa vie il tint la même position.

FIGURE B.1 – Expériences de Galvani²⁸

B.3 Frankenstein

Avant d'en venir à la découverte de la pile, il peut être intéressant de montrer quel fut l'impact dans les milieux non scientifiques de la découverte de Galvani et, plus généralement, des découvertes en électricité du début du *XIX^e* siècle. Nous allons pour cela nous intéresser à l'ouvrage de Mary Shelley très caractéristique de cette époque : *Frankenstein* (publié en 1818).

Tout le monde connaît l'histoire de ce scientifique, le docteur Frankenstein, qui fit renaître un monstre de l'assemblage de parties de plusieurs cadavres. Les films actuels évoquent Frankenstein recourant à l'électricité céleste pour donner vie à son monstre. C'est, en effet, au cours d'une nuit de violent orage

qu'on le représente réalisant son expérience grâce aux éclairs.

On peut penser cette aventure directement sortie d'une imagination fertile. Ce serait commettre une erreur car il apparaît à l'étude attentive des propos de Mary Shelley (Thuillier, 1990, pp. 1368-78.) que le roman tira beaucoup des découvertes de son temps. Non seulement Mary Shelley connaissait Erasmus Darwin, grand-père de Charles, qui s'intéressait beaucoup à l'électricité et qui connaissait notamment Benjamin Franklin, mais encore Mary était mariée à un homme qui expérimenta beaucoup à l'aide de la pile de Volta (voir plus loin). Mais, de là à

« ... aller déterrer des cadavres pour y brancher des électrodes, on pourrait croire

qu'un tel acte à été purement et simplement inventé pour "terrifier" le lecteur. En fait, c'est une description fidèle qui renvoie à des faits historiques bien datés ... ».

Thuillier (1990)

En effet, le professeur Aldini, neveu et disciple de Galvani, expérimente à l'aide de la pile sur des têtes de bœufs et même sur des cadavres de meurtriers qui ouvraient les yeux, bougeaient des membres et parvenaient même à souffler des bougies (contraction spasmodique des poumons). Les expériences galvaniques sur des cadavres sont en fait si nombreuses qu'en Prusse les autorités interdisent, en 1804, l'utilisation des criminels décapités.

Pourquoi de telles expériences ? En fait

« ... bien des savants estimaient que les phénomènes vitaux étaient explicables en terme de physique et de chimie. Le "fluide vital", très certainement, avait quelque chose à voir avec le calorique, avec le fluide magnétique, avec le fluide électrique ... Pour des raisons diverses, la notion de génération spontanée connaissait un renouveau ; et, grâce à la pile de Volta, l'électricité révélait chaque jour de nouvelles et merveilleuses propriétés. Aussi était-il tentant d'imaginer qu'une biogenèse électrique, chimique ou électrochimique serait bientôt réalisable. En fait, Mary Shelley a simplement évoqué la possibilité de construire une puissante machine qui insufflerait [une "étincelle de vie"] dans des tissus complètement nécrosés ».

Thuillier (1990)

en accord avec ce qui à l'époque semblait possible.

En 1836, un savant anglais, Andrew Crosse, crut même qu'il avait réussi à créer des arachnides artificiels à l'aide d'une pierre vésuvienne et d'un courant électrique. Il se manifestait ainsi, grâce à ces pseudo-biogenèses, des thèses "monistes" (systèmes selon lesquels l'univers serait fait d'une seule substance, selon lesquelles tout est matière, monisme matérialiste, ou esprit, monisme spiritualiste) selon lesquelles il y aurait continuité entre la "matière inorganique" et la "matière organique". En cette époque où les thèses

créationnistes étaient dominantes, pour pouvoir comprendre que « la vie et l'organisation sont essentiellement des phénomènes physiques » Thuillier (1990), il fallait un mythe épistémologique qui prépara les esprits, qui, pour reprendre l'expression même de Darwin (notice historique à "L'origine des espèces"), « appela l'attention sur le sujet, à combattre les préjugés et à préparer les esprits à l'adoption d'idées analogues » Thuillier (1990).

B.4 La pile de Volta

Les expériences galvaniques eurent donc incontestablement sur leur temps un grand impact. Galvani proposa une interprétation de celles-ci qui fut unanimement adoptée pendant quelques temps : l'électricité (à l'époque ce qu'on appelait les deux fluides) est produite à la surface de séparation nerf-muscles.

Une autre interprétation va pourtant être proposée. C'est un physicien nommé Volta qui le fait. Après avoir dans un premier temps accepté la théorie de Galvani, il en vient à considérer que

« ... le nerf et le muscle sont secondaires puisqu'on peut obtenir des décharges en plaçant une grenouille entière (ou sa propre langue ...) entre deux métaux différents. Pour lui, les métaux appliqués aux corps humides des animaux peuvent d'eux-mêmes et de par leur propre pouvoir exciter et déloger le fluide électrique de son état de repos, si bien que les organes des animaux n'agissent que passivement ».

(Rosmorduc, 1987, p. 187.)

Volta pense donc que la cuisse de grenouille agit comme un simple détecteur très sensible. De fait, c'est, avec la langue, le seul détecteur assez sensible pour détecter des tensions aussi faibles que celles mises en jeu dans ces expériences.

La discussion entre les partisans des deux théories fut vive. « A Londres, il se créa même deux sociétés savantes rivales, l'une en faveur du "galvanisme", l'autre en faveur du "voltaïsme". »

Mais Volta a vu juste. Il expérimente et remarque que les phénomènes sont plus nets quand le circuit

est composé par deux métaux soudés. Il élabore alors une "théorie du contact" :

« ... c'est à la surface de contact entre deux métaux différents et, plus généralement, entre deux corps différents, que l'électricité subit la *force*, ou l'*impulsion* qui la met en mouvement ».

(Bauer, 1949, p. 68.)

« ... Il tente alors d'obtenir un courant électrique en accolant d'abord deux disques formés de métaux différents ; il forme ensuite une pile de ces paires de disques pour accumuler leurs effets. Il n'obtient aucun effet jusqu'à ce qu'il interpose entre les disques, des feuilles de drap imbibées d'une solution saline ».

(Loqueneux, 1987, p. 81.)

La pile de Volta était née, mais sa compréhension loin d'être faite. Volta écrit en 1796 :

« L'attouchement de conducteurs différents, surtout métalliques [...], que j'appellerai conducteurs secs, ou de la première classe, avec des conducteurs humides, ou de la seconde classe, éveille le fluide électrique et lui imprime une certaine impulsion ou incitation. Je ne saurai encore rendre compte de la manière dont cela se fait, mais il suffit que cela soit un fait et un fait général ».

(ent, 1961, p. 205.)

Pour Volta en effet, le rôle du conducteur liquide (dont nous avons vu qu'il est à l'origine de la formation et du déplacement des ions et donc de la force déplaçant les électrons) est passif. Il ne fait qu'assurer entre deux métaux un contact intime qui permet le passage de l'électricité.

A l'époque, la pile est comparée à une bouteille de Leyde se déchargeant puis se rechargeant instantanément. En effet,

« ... la tension aux bornes d'une pile de l'époque, de forte résistance interne, devenait très faible lorsqu'on reliait ses pôles par un conducteur métallique de faible résistance. Si E est la force électromotrice de la pile, r sa résistance interne et R la résistance

du conducteur, la différence de potentiel U aux bornes de la pile est :

$$U = E - r \cdot I = E - r \cdot \frac{E}{r + R} = E \cdot \frac{1}{1 + \frac{r}{R}}$$

U est négligeable devant E lorsque r est grande devant R .

Mais la nature même du programme de recherche [de l'époque], résumé en ces termes par J. Ritter : réaliser

« ... un très grand nombre d'expériences qui prouvent que la tension de la pile suit partout les mêmes lois que celles qui sont produites par la machine électrique »

amena les physiciens à admettre la nullité de tension aux bornes de la pile en circuit fermé. En effet, l'analogie avec une batterie électrique ou bouteille de Leyde était alors complète : lorsque la pile est isolée, elle reproduit les forces électriques à distance exercées par la batterie électrique et lorsque ses pôles sont reliés, elle se décharge et ne manifeste plus de propriétés électriques ».

(Blondel, 1982, pp. 20 et 21.)

La notion de conservation de l'énergie étant encore pratiquement ignorée, personne ne se posa la question de savoir « à quel prix s'obtenaient ces charges et ces tensions toujours renouvelées ».

(ent, 1961, p. 206.)

La découverte de la pile fit une renommée considérable à Volta.

« Bonaparte lui-même fait venir Volta à Paris en 1801 pour faire une démonstration de son appareil, lui décerne une pension et le nomme sénateur d'Italie, afin de « sceller l'alliance du talent et de la science pour l'immortalité de la république ». Conscient de la nouveauté et de l'importance de la découverte, il instaure également un prix de 60'000 F pour toute découverte future en électricité de la même importance" (ce prix ne fut jamais attribué).

(Rosmorduc, 1987, p. 188.)

Cependant la pile de Volta avait un défaut la rendant rapidement inutilisable. Il se formait des bulles autour de l'une des électrodes qui empêchaient le courant de naître. Il fallut donc attendre la deuxième moitié du *XIX*^e siècle pour que Leclanché découvre une pile qui n'ait pas ce défaut et permette l'éclairage à arc électrique et le télégraphe.

Pour conclure, disons encore qu'à l'époque (première moitié du *XIX*^e siècle) les laboratoires bien pourvus possédaient des piles faites de centaines de couples (zinc-cuivre).

« A Paris, Napoléon offrit une batterie de 600 unités à l'École Polytechnique. En Angleterre, Sir Humphry Davy [chimiste et physicien qui grâce à cette pile découvrit l'arc électrique qui allait plus tard servir comme moyen d'éclairage et dont la lumière est comparée à celle du soleil] en possédait une de 3000 unités. Le courant fourni par de telles batteries ne dépendait que de la résistance du circuit, batterie incluse, et il n'était pas exceptionnel d'atteindre des courants de 10 *ampères*. Ainsi, la puissance fournie pouvait être de l'ordre de 10 *kW*, 10'000 fois supérieure à celle obtenue avec une machine électrostatique. La différence entre les effets observés était telle que durant de nombreuses années les physiciens se sont demandés si l'électricité de la machine électrostatique et celle de la pile voltaïque (appelée souvent courant galvanique) étaient de même nature ».

(Segré, voir, p. 150.)

La pile fut aussi abondamment utilisée dans des buts thérapeutiques grâce aux décharges qu'elle provoquait. L'École Nationale de Médecine possédait d'ailleurs la seconde pile la plus puissante de France, après celle offerte par Napoléon à l'École Polytechnique.

Signalons enfin que c'est en hommage à Volta que l'unité de tension est nommée le volt.

B.5 Courant et tension : Ampère

La question est très complexe et, comme déjà dit, est née de questions dépassant les problèmes électrocinétiques qui nous intéressent, dans des tentatives de comprendre des phénomènes magnétiques produits électriquement. C'est essentiellement la tentative d'Ampère pour comprendre l'expérience d'Ersted (voir paragraphe 4.2.3) de déviation d'une boussole par un circuit électrique, hors d'un cadre d'action électrostatique de type coulombien, à l'aide d'une action entre courants. C'est donc au prix d'une toute petite incursion dans le domaine du magnétisme que l'on va pouvoir découvrir succinctement l'émergence des notions de courant et de tension.

A l'époque (dans les années 1820),

« les notions de tension et de courant électrique ne sont pas encore des concepts scientifiques mais seulement un classement en deux catégories disjointes d'un ensemble de phénomènes ».

(Blondel, 1982, p. 19.)

La première catégorie concerne les effets de répulsion et d'attraction et les effets électrostatiques produits sur des isolants par des corps chargés. L'électricité étant comprise à l'époque en terme de deux fluides différents, on pensait que les isolants les contenaient simultanément. Dès lors, quand un isolant était placé entre deux plaques différemment chargées, il apparaissait une tension qui séparait les fluides, chargeant ainsi (par influence) provisoirement l'isolant.

La seconde catégorie englobe les effets magnétiques produits par des circuits électriques. De nos jours on sait en effet qu'un courant peut faire tourner une boussole.

Tout le problème était donc de savoir ce qu'on entendait par courant. On savait que la pile produit

« ... une accumulation d'électricités opposées sur chaque pôle. Mais qu'en est-il du conducteur [reliant les deux pôles] ? Est-il *le lieu* d'un transport d'électricité, [d'un transport de] fluide sans action sur la matière, ou a-t-il une structure microscopique

jouant un rôle prépondérant dans le phénomène [de transport de l'électricité]? C'est là qu'Ampère (le physicien auquel on doit le nom de l'unité de courant) fut en avance sur son temps.

Tout d'abord, il y eut l'explication de la magnétisation du fil de Biot. Voici comment il la comprend :

« Jusqu'ici, on n'avait jamais pu rendre magnétique ni l'argent, ni le cuivre, ni aucun autre métal (sauf le fer, le nickel et le cobalt) ... Le courant électrique leur donne à tous cette propriété ... Il la leur donne passagèrement par sa présence ; il la répartit dans toute la masse d'une manière également singulière et qui ne ressemble point à ce que nous produisons quand nous développons le magnétisme par nos procédés d'aimantation ordinaires. »

Biot se demande plus loin

« ... si ces effets résultent d'une action propre immédiatement exercée par l'électricité en mouvement sur les molécules magnétiques, ou si, comme toutes les analogies nous semblent l'indiquer, ils ne sont que la conséquence secondaire d'une véritable aimantation imprimée par le courant électrique aux conducteurs métalliques, aimantation moléculaire différente, non pas dans son principe, mais dans sa distribution seule de l'aimantation longitudinale » ordinaire.

Plus loin encore :

« Si l'on calcule l'action qu'exercerait à distance une aiguille aimantée d'une longueur infiniment petite et presque moléculaire, on verra que l'on

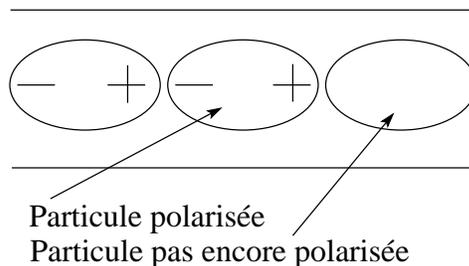
peut former des assemblages de telles aiguilles, qui exerceraient des forces transversales [...] ».

[...] Biot est donc évidemment un newtonien convaincu. Pur expérimentateur, il comprend la signification de ses résultats si simples, mais ne peut renoncer à l'hypothèse des fluides magnétiques. C'est la loi de Coulomb qu'il considère comme primordiale, toutes les lois de la nature devant se modeler sur celle de la gravitation. Il ne voit pas qu'il est logiquement impossible d'imaginer une distribution magnétique capable d'engendrer des forces qui ne satisferaient pas au principe de l'égalité de l'action et de la réaction ».

(Bauer, 1949, pp. 73-75.)

Avant lui, d'autres savants proposèrent des explications. Notamment un physicien nommé Ørsted qui pensa que le milieu conducteur est fait de petits éléments neutres. Chacun de ceux-ci, sous l'influence de l'élément le précédant dans le circuit, prend successivement d'un côté la charge opposée à celui qui le précède et de l'autre une charge opposée à son autre côté. C'est une interprétation électrostatique.

FIGURE B.2 – Propagation par influence.



Ampère, quant à lui, vérifie qu'un fil conducteur très long (une vingtaine de mètres) agit encore en son milieu sur la boussole.

«

« Il avoue alors que cette expérience lui a d'abord paru ap-

puyer l'opinion que c'est un véritable transport d'électricité qui a lieu le long du conducteur, et non pas seulement une sorte de polarisation électrique de ses particules ».

L'absence d'affaiblissement de l'effet magnétique à grande distance suggère en effet un phénomène de conduction ».

(Blondel, 1982, p. 81.)

Mais il abandonne cette théorie où ce sont les particules même du conducteur qui se déplacent (interprétation suggérée à Ampère par Laplace (Blondel, 1982, p. 81) (Loqueneux, 1987, p. 85, note 22.)) pour élaborer alors une théorie de la propagation du courant électrique voisine de celle d'Ersted. Il "voit" les particules d'un conducteur comme entourées d'un fluide neutre que l'électricité décompose en deux atmosphères opposées. Celles-ci, comme les particules polarisées d'Ersted, s'influencent entre elles, créant le courant électrique. Ampère a une

« ... vision de la structure des métaux qui évoque le nuage électronique [c'est en effet, de nos jours, par le déplacement d'un nuage d'électrons entourant les noyaux atomiques que l'on explique le courant électrique] :

« ... toutes les atmosphères électronégatives (...) réagiront les unes sur les autres, de sorte qu'il y aura une certaine quantité d'électricité négative distribuée d'une manière continue entre les atomes, plus intense seulement près de ces atomes »

».

(Blondel, 1982, p. 81.)

« L'expérience [du fil conducteur très long] fournit en outre à Ampère une preuve [...] du fait que la tension aux bornes de la pile n'est pour rien dans l'action sur une aiguille située à une si grande distance : l'effet est nécessairement dû au courant ».

(Blondel, 1982, p. 81.)

Il distingue donc nécessairement les deux notions sans pour autant faire le lien entre la tension et le potentiel électrostatique (celle-ci sera faite en 1845 par un physicien nommé Kirchhoff). On trouve un exposé lumineux de cette distinction dans son premier mémoire de 1820 :

« L'action électromotrice [ce qui fait se mouvoir l'électricité] se manifeste par deux sortes d'effets que je crois devoir distinguer par une définition précise.

J'appellerai le premier la tension, le deuxième courant électrique."

La tension se manifeste quand un circuit "où a lieu une action électromotrice" est ouvert. Les phénomènes observables sont alors "les attractions et répulsions connues depuis longtemps".

Il y a courant "lorsque les deux corps entre lesquels l'action électromotrice a lieu sont d'ailleurs [de par ailleurs] en communication par des conducteurs entre lesquels il n'y a pas d'autre action électromotrice égale et opposée à la première ... Les corps légers ne sont plus sensiblement attirés [effet électrostatique]. Cependant l'action électrostatique continue d'agir, car si de l'eau, un acide, un alcali ou une dissolution saline font partie du circuit, les corps sont décomposés ... ; et en outre comme M. Ersted vient de le découvrir, l'aiguille aimantée [la boussole] est détournée de sa direction". On observe de plus "une sorte d'attractions et de répulsions toutes différentes des attractions et répulsions électriques ordinaires, que je crois avoir reconnues le premier et que j'ai nommées attractions et répulsions des courants électriques".

En circuit ouvert, "on ne peut concevoir l'action électromotrice que comme portant constamment l'électricité positive dans l'un des corps et l'électricité négative dans l'autre : dans le premier moment, où rien ne s'oppose à l'effet qu'elle tend à produire, les deux électricités s'accumulent chacune dans la partie du système total vers laquelle elle

est portée, mais cet effet s'arrête dès que la différence des tensions électriques donne à leur attraction mutuelle une force suffisante pour faire équilibre à l'action électromotrice."

En circuit fermé, "les tensions disparaissent [six ans plus tard, Ohm montrera qu'en fait elles ne disparaissent pas, qu'elles peuvent même être conséquentes et qu'elles sont reliées au courant par sa fameuse loi. Voir ci-dessus l'explication de la compréhension d'Ampère en terme de résistance interne des piles.], ou, du moins, deviennent très petites ... Comme l'attraction mutuelle des deux électricités ... ne peut plus faire équilibre à l'action électromotrice, il en résulte un double courant, l'un d'électricité positive, l'autre d'électricité négative, partant en sens opposé des points où l'action électromotrice a lieu ... Les courants dont je parle vont s'accéléralant jusqu'à ce que l'inertie des fluides électriques et la résistance qu'ils éprouvent par l'imperfection même des meilleurs conducteurs fasse équilibre à la force électromotrice, après quoi, ils continuent indéfiniment avec une vitesse constante, tant que cette force conserve la même intensité. C'est cet état que je nommerai pour abrégé courant électrique ... C'est au courant seul qu'est due la décomposition de l'eau et des sels ; ce ne peut être les tensions, mais seulement le courant qui influe sur la direction de l'aiguille aimantée. L'électromètre [électroscope à feuille d'or, par exemple] ordinaire indique quand il y a tension et quelle est cette tension. [Mais] il manquait un instrument qui fit connaître la présence du courant électrique, qui en indiqua l'énergie et la direction ... Cet instrument existe aujourd'hui [c'est Ampère lui-même qui l'a inventé] ... on doit lui donner le nom de galvanomètre" ».

(Bauer, 1949, pp. 75-77.)

Le galvanomètre d'Ampère était un simple fil faisant dévier une aiguille aimantée. Remarquez que l'un des

premiers galvanomètres véritablement efficaces fut la boussole des tangentes de Pouillet (1834) inventée pour l'étude de la loi d'Ohm.

Non seulement Ampère propose une théorie très juste de la conduction dans les métaux et distingue précisément entre tension et courant, mais encore il propose la première définition théorique précise (encore utilisée aujourd'hui) de l'intensité du courant :

« l'intensité du courant est "*ce qui passe d'électricité en temps égaux*", c'est-à-dire le débit d'électricité dans le conducteur ».

(Blondel, 1982, p. 157.)

B.6 Ohm et la notion de résistance

On a vu qu'Ampère opposait tension et courant. Sur ce point il était dans l'erreur et c'est à Ohm que l'on doit l'expression de la relation précise entre les deux :

$$U = R \cdot I$$

Remarquons pour finir qu'Ohm avait une conception très particulière du courant électrique puisque pour lui

« la force électroscopique est [...] le concept primordial, c'est elle [et non les particules de matière] qui est transportée d'un endroit à un autre ».

(Loqueneux, 1987, p. 81.)

B.7 Conclusion

Elle sera simple. A travers toute l'histoire des sciences, on remarque que non seulement l'erreur est présente, mais qu'elle est stimulante. Stimulante pour ceux qui la font (sans s'en rendre compte, elle permet d'aborder des sujets par des chemins que l'on n'oserait suivre, en s'en rendant compte par des expériences qui la font apparaître, elle permet d'utiliser celles-ci pour comprendre encore mieux les phénomènes) et stimulante pour ceux qui ne la font pas, mais doivent imaginer comment la rendre explicite à

l'aide d'expériences qui souvent remettent en cause leur propre savoir.

Quoi qu'il en soit, l'erreur est une composante fondamentale de la science, car c'est en ne la craignant pas que de grands savants ont osé, le terme n'est pas trop fort, avancer leur arguments révolutionnaires.

La pile électrique

Nous allons dire quelques mots du plus “simple” des générateurs électriques : la pile. Il existe plusieurs sortes de piles. Nous nous limiterons ici à l’explication du principe de fonctionnement d’une pile chimique Daniell à électrolyte, puis nous verrons rapidement que le principe est identique pour une pile sèche du type de celles que nous utilisons dans nos lampes de poche.

Remarquons que la pile de Daniell est une pile plus évoluée que la pile de Volta, par exemple. Elle est non polarisable. En effet, une pile voltaïque est faite de deux électrodes (de cuivre et de zinc) baignant dans une solution diluée d’acide sulfurique (H_2SO_4). La production d’électrons se passe alors de la manière suivante :

« Lorsqu’une électrode de zinc est immergée dans un électrolyte, quelques ions de zinc (Zn^{2+}) se dissolvent, laissant chacun deux électrons sur l’électrode. Cette réaction s’écrit :



Ce procédé se poursuit jusqu’à ce que l’électrode devienne suffisamment chargée pour attirer les ions Zn^{2+} aussi rapidement qu’elle les perd. Un état d’équilibre dynamique s’établit alors : les ions entrent dans l’électrolyte au même taux qu’ils le quittent.

De la même façon, les ions d’une élec-

trode de cuivre, immergée dans un électrolyte, se dissolvent. La réaction s’écrit :



Ce procédé se poursuit également jusqu’à ce que l’électrode de cuivre capture les ions Cu^{2+} aussi rapidement qu’elle les perd. A l’équilibre, le cuivre et le zinc, ou tout autre métal, sont chargés négativement. Comment pouvons nous alors expliquer qu’un courant électrique circule dans le circuit [...] ?

Cette explication repose sur le fait que la facilité avec laquelle les ions se dissolvent diffère d’un métal à l’autre. Plus cette dissolution se fait facilement, plus l’électrode devient chargée négativement. Dans le cas du zinc et du cuivre, la charge négative du zinc est plus grande que celle du cuivre. En conséquence, si deux métaux, immergés dans un électrolyte, sont reliés par un fil externe, les électrons seront repoussés par le zinc vers le cuivre. La plaque de zinc forme donc la borne négative de la pile et la plaque de cuivre forme la borne positive. Cependant, si nous utilisons du zinc et de l’aluminium pour réaliser une pile voltaïque, la borne négative sera la plaque d’aluminium et la borne positive sera la plaque de zinc, car ce dernier se dissout plus diffi-

lement que l'aluminium (en dépit de son poids léger, de son prix peu élevé et de sa grande réactivité, l'aluminium n'est pas encore utilisé dans les piles commerciales parce qu'une mince pellicule d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) se forme à sa surface, empêchant ainsi l'aluminium de réagir avec l'électrolyte) Inconnu (1989).

Dans une pile voltaïque cuivre-zinc, l'énergie requise pour maintenir le courant est fournie par la réaction du zinc avec l'électrolyte. Le cuivre ne réagit pas du tout, car l'accumulation d'ions positifs dans la solution les repousse vers le cuivre où ils se combinent avec les électrons.

Une autre réaction se produit également dans l'électrolyte, près de la plaque de cuivre : les ions H^+ , provenant de la dissociation de l'acide sulfurique, se combinent avec les électrons selon la réaction :

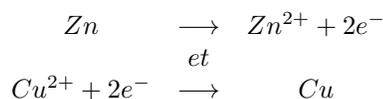


Les atomes d'hydrogène ainsi formés s'unissent immédiatement pour donner naissance à de l'hydrogène moléculaire (H_2). Celui-ci se dépose, sous forme de petites bulles, sur l'électrode de cuivre. Au bout d'un certain temps, une mince pellicule de bulles d'hydrogène recouvre l'électrode, empêchant ainsi les électrons de se combiner avec les ions Zn^{2+} . Cela diminue le courant, car les ions Zn^{2+} peuvent difficilement cueillir les électrons fournis par l'électrode de cuivre.

Ces effets d'interférence dus à l'accumulation de produits de réaction sur une électrode ou à l'appauvrissement des réactifs près d'une électrode portent le nom de polarisation. La polarisation rapide qui se produit dans une pile voltaïque limite le courant qu'on peut en tirer. Cette pile fut donc remplacée par des versions améliorées vers 1875 pour la galvanisation et la télégraphie.

John Frédéric Daniell (1790-1845) mit au point, en 1836, une pile non polarisable à

deux électrolytes. Les deux électrolytes sont une solution de sulfate de cuivre ($CuSO_4$) et de sulfate de zinc ($ZnSO_4$) séparés par une cloison poreuse. La cloison permet à quelques ions de passer d'un électrolyte à l'autre, mais empêche les solutions de se mélanger totalement. Une électrode de cuivre est immergée dans la solution de sulfate de cuivre et une électrode de zinc est immergée dans la solution de sulfate de zinc. Lorsque le circuit est fermé, à l'aide d'un fil, des ions de zinc passent de l'électrode à la solution de sulfate de zinc, alors que le cuivre de la solution de sulfate de cuivre se dépose sur l'électrode de cuivre. Ces réactions s'écrivent :

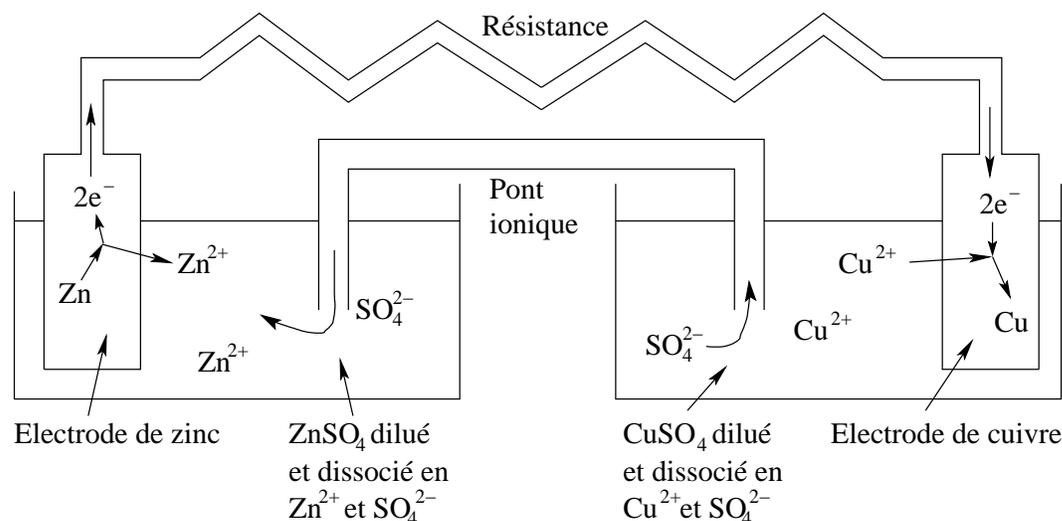


Cette pile est non polarisable, car le cuivre qui se dépose sur le cuivre ne change ni les propriétés électriques ni les propriétés chimiques de l'électrode. De plus, la force électromotrice [ou tension électromotrice] de cette pile est plus élevée, car les réactions aux électrodes y contribuent. »^a

On peut, en première approximation, se représenter un atome comme constitué d'un noyau chargé positivement par les protons dont il est fait, noyau autour duquel tournent à différentes distances des électrons chargés négativement (notons que c'est une image fautive qui a été développée dans les années 1910, puis abandonnée ; elle est cependant assez précise pour expliquer ce que nous cherchons à comprendre). Si le nombre de protons est le même que celui d'électrons, alors l'atome est électriquement neutre. Si, par contre, on a plus (respectivement moins) de protons que d'électrons, alors il est chargé positivement (respectivement négativement). On représente un atome (ou une molécule faite de plusieurs atomes) qui a trop ou pas assez d'électrons (du cuivre auquel il manquerait deux électrons par exemple), par son symbole surmonté du nombre de

a. La source de ce texte m'est aujourd'hui inconnue.

FIGURE C.1 – Principe de fonctionnement de la pile de Daniell



charges (positives ou négatives) en trop (Cu^{2+} , par exemple). Disons encore que l'état stable d'un atome étant neutre, celui-ci cherche toujours à avoir le même nombre d'électrons que de protons, mais que certains le désirent plus que d'autres, il arrive que des atomes doivent céder leurs électrons.

Sachant cela, on peut maintenant comprendre le fonctionnement d'une pile à partir du schéma de la figure C.1.

On voit sur le schéma deux électrodes (simples plaques de métal). Celle de gauche est en zinc et celle de droite en cuivre. Elles sont reliées par le haut par un simple fil conducteur (nous verrons par la suite au paragraphe 3.2 ce qu'est une résistance). C'est dans ce fil que circulent les électrons qui peuvent faire fonctionner un appareil électrique (comme une lampe, par exemple). Par quoi sont-ils produits ?

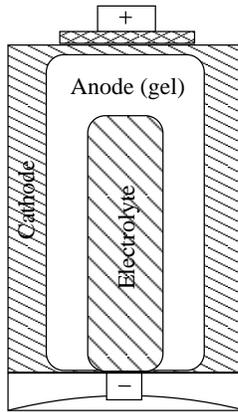
L'électrode de droite baigne dans un liquide où est présent du cuivre auquel il manque deux électrons (Cu^{2+}). Il n'est pas stable. Il va donc "fusionner" avec l'électrode de cuivre qui va mettre en commun avec lui deux électrons. Globalement, il va donc toujours manquer deux électrons. Si le circuit était ouvert, l'électrode de cuivre serait positive. Le circuit étant fermé, elle "attire" les électrons.

D'autre part, le cuivre auquel il manque deux électrons vient de la dissociation dans l'eau de la molécule $CuSO_4$ en deux parties Cu^{2+} et SO_4^{2-} . Quand le cuivre Cu^{2+} fusionne avec celui de l'électrode, il libère donc un SO_4^{2-} qui, délaissé, va s'en aller par le pont ionique vers l'autre électrode. Rappelons qu'il a deux électrons en trop. Il va donc chercher un partenaire avec qui les partager. Pour cela, il va "attaquer" l'électrode de zinc et en tirer un élément (Zn^{2+}) auquel il manque deux électrons. L'électrode de zinc libère donc des électrons, c'est-à-dire deviendrait négative si le circuit était ouvert.

On voit donc par quel procédé chimique sont produits les électrons qui vont tourner dans le circuit fermé.

Une pile sèche (comme celle des lampes de poche) fonctionne selon le même principe. Le liquide qu'elle contient se trouve parfois immobilisé par une substance gélatineuse ou absorbante, comme anciennement de la sciure de bois, plus souvent directement mélangé à une électrode en poudre pour former un gel. L'illustration C.2 montre le schéma d'une pile alcaline où l'une des électrodes (appelée cathode) est faite d'un oxyde métallique (MnO_2) solide et l'autre (appelée anode) d'une poudre de zinc mélangée à un

FIGURE C.2 – Pile sèche



électrolyte sous forme de gel (la partie centrale de la pile est simplement un réservoir d'électrolyte qui en fournit à l'anode pendant la décharge et le stockage.

Relevons pour finir que l'explication du fonctionnement d'une pile a nécessité le recours à une théorie atomique (des électrons tournent autour d'un noyau ...). Or, la première pile fut découverte (en 1794) plus de cent ans avant qu'une telle théorie ne soit construite (en 1913). La compréhension du fonctionnement d'une pile fut donc longue, mais il est intéressant de noter que son absence ne priva pas les physiciens de découvertes de notions comme la tension et le courant.

La notion de tension

On va présenter ici la définition moderne de la tension et comment on peut de nos jours se la représenter aussi simplement que possible. La notion de potentiel va aussi être dégagée. Pour être le plus simple possible, une analogie gravitationnelle sera utilisée.

D.1 Analogie gravitationnelle

Supposons une masse m qui tombe d'une hauteur h_i à une hauteur h_f ($h_i > h_f$). Le travail du poids lors de cette chute d'une hauteur h se calcule alors de la manière suivante :

$$\begin{aligned} A &= F \cdot d = mg \cdot h = mg \cdot (h_i - h_f) \\ &= mg \cdot h_i - mg \cdot h_f = E_i - E_f \end{aligned}$$

On remarque que le travail se décompose en deux termes ($mg \cdot h_i$ et $mg \cdot h_f$) qui ne dépendent chacun que d'une position donnée dans l'espace. Ainsi, le travail ne dépend que des positions initiales et finales du mouvement (et par ailleurs aussi évidemment de la masse m et de l'accélération terrestre g). De plus, il correspond à une différence de deux termes. On peut donc associer chacun de ces deux termes à une grandeur localisée dans l'espace. On appelle cette grandeur énergie potentielle gravifique et on la note E . Ainsi, le travail correspond à une différence d'énergie potentielle gravifique. On peut dire qu'en tout point la masse à potentiellement en elle de l'énergie. Quand

elle tombe, elle perd une partie de cette énergie qui se convertit en énergie cinétique (énergie de mouvement). Celle-ci correspond simplement à la différence d'énergie potentielle de la masse qui passe de la hauteur initiale à la hauteur finale.

On a dit que l'énergie potentielle dépend de la masse. On peut en faire abstraction en calculant le travail par unité de masse :

$$\begin{aligned} \frac{A}{m} &= \frac{F \cdot d}{m} = \frac{mg \cdot h}{m} = g \cdot (h_i - h_f) \\ &= g \cdot h_i - g \cdot h_f = V_i - V_f = U \end{aligned}$$

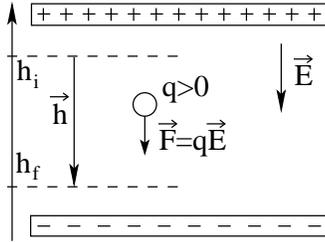
On ne parle plus alors d'une différence d'énergie potentielle, mais d'une différence de potentiel V . Il s'agit tout simplement d'une énergie potentielle par unité de masse. De plus, on peut définir une nouvelle grandeur U qui est précisément le travail par unité de masse, mais qu'on pourrait appeler aussi, pour des raisons que nous verrons plus tard, tension gravifique.

Pour interpréter respectivement les notions de potentiel et de tension d'une manière simple, on peut faire une analogie respectivement avec l'altitude et la différence d'altitude.

D.2 Tension et potentiel électrique

De manière parfaitement analogue à la situation gravitationnelle précédente, on suppose une charge q

FIGURE D.1 – Énergie potentielle et potentiel électrique



qui se déplace dans le sens du champ électrique d'une position h_i à une position h_f (voir figure D.1).

On suppose q positif. Il s'exerce alors une force électrique $F = q \cdot E$ sur q . Le travail de cette force pour un déplacement d'une distance h se calcule alors de la manière suivante :

$$\begin{aligned} A &= F \cdot d = qE \cdot h = qE \cdot (h_i - h_f) \\ &= qE \cdot h_i - qE \cdot h_f = E_i^{pot} - E_f^{pot} \end{aligned}$$

où il ne faut pas confondre le champ électrique E avec l'énergie potentielle électrique E^{pot} . Ainsi, on pose par définition de l'énergie potentielle électrique :

$$E^{pot} = qE \cdot h$$

Cette énergie dépend, comme on le voit, de la charge q . On peut en faire abstraction en calculant le travail par unité de charge :

$$\begin{aligned} \frac{A}{q} &= \frac{F \cdot d}{q} = \frac{qE \cdot h}{q} = E \cdot (h_i - h_f) \\ &= E \cdot h_i - E \cdot h_f = V_i - V_f = U \end{aligned}$$

On définit alors le potentiel électrique par :

$$\boxed{V = E \cdot h} \quad (D.1)$$

et la tension électrique U comme une différence de potentiel électrique :

$$\boxed{U = V_i - V_f} \quad (D.2)$$

L'analogie utilisée précédemment est alors encore valable : on dit que la tension est la différence d'altitude qui va permettre à un courant d'eau de s'écouler.

Relevons finalement que l'unité de la tension, le volt, correspond à celle du potentiel et représente un travail par unité de charge :

$$[U] = \frac{[A]}{[q]} = \frac{J}{C} = \frac{joule}{coulomb}$$

Ainsi, on peut aussi écrire :

$$\boxed{A = q \cdot U} \quad (D.3)$$

Circuits en série et en parallèle

La loi d'Ohm n'est valable que pour un circuit fermé composé d'un générateur et d'une seule résistance. Lorsqu'on est confronté à un système de plusieurs résistances les calculs se compliquent. Une méthode simple pour résoudre ce genre de problème est celle dite de la résistance équivalente. Elle consiste à remplacer le circuit complexe composé de plusieurs résistances par un circuit équivalent composé d'une seule résistance appelée alors résistance équivalente. Ce circuit est constitué d'un générateur de même tension et produisant le même courant que pour le circuit complexe. Le problème est alors de trouver la valeur de cette résistance équivalente. On distingue deux cas simples.

E.1 Deux résistances en série

Le générateur délivre une tension U . Notons U_1 la tension aux bornes de la résistance R_1 et U_2 celle aux bornes de R_2 (voir figure E.1).

On peut écrire :

$$U = U_1 + U_2$$

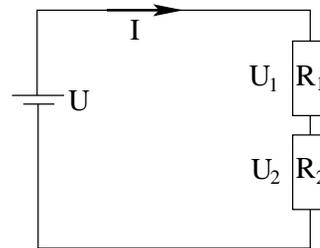
et selon la loi d'Ohm :

$$U_1 = R_1 \cdot I \quad \text{et} \quad U_2 = R_2 \cdot I$$

Pour le circuit équivalent, on a :

$$U = R \cdot I$$

FIGURE E.1 – Circuit de deux résistances en série



Ainsi, on peut écrire en combinant les équations ci-dessus :

$$R \cdot I = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I$$

et donc finalement :

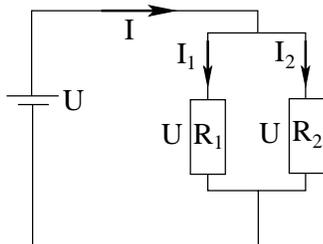
$$\boxed{R = R_1 + R_2} \quad (\text{E.1})$$

Ainsi, pour résumer, la résistance équivalente d'un circuit avec deux résistances en série est égale à la somme de chacune des deux résistances.

E.2 Deux résistances en parallèles

Le courant dans ce circuit (voir figure E.2) n'est pas le même dans les deux résistances.

FIGURE E.2 – Circuit de deux résistances en parallèle



tout à fait général, il faut utiliser d'autres équations, dites de Kirchhoff. Mais elles dépassent le cadre de ce cours.

On peut écrire :

$$I = I_1 + I_2$$

et selon la loi d'Ohm :

$$U = R_1 \cdot I_1 = R_2 \cdot I_2$$

et donc :

$$I = \frac{U}{R} \quad I_1 = \frac{U}{R_1} \quad I_2 = \frac{U}{R_2}$$

Pour le circuit équivalent, on a encore :

$$U = R \cdot I$$

Ainsi, on peut écrire en combinant les équations ci-dessus :

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

et donc finalement :

$$\boxed{\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (\text{E.2})$$

Remarquons par ailleurs que :

$$R < R_1 \text{ et } R_2$$

E.3 Circuit quelconque

Pour un circuit quelconque, on peut utiliser une combinaison des deux méthodes ci-dessus. Cependant, cela ne fonctionne pas toujours. Pour un cas

Vitesse des électrons dans un fil conducteur

F.1 Ordre de grandeur

Un calcul simple montre que la vitesse des électrons dans un fil de cuivre de 1 mm^2 parcouru par un courant de 10 A est de l'ordre de $0,6 \text{ mm/s}$.

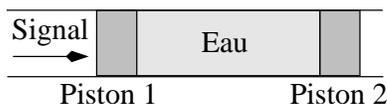
F.2 Modélisation

Comment se fait-il alors, penserez-vous, que l'on puisse téléphoner à grande distance sans observer de retard apparent dans la réponse de notre correspondant? En fait, dans un fil conducteur, il y a trois vitesses. La vitesse d'agitation thermique des électrons qui est très grande (de l'ordre de $120'000 \text{ m/s}$ ou $342'000 \text{ km/h}$ pour une température de $27 \text{ }^\circ\text{C}$), mais totalement désordonnée : les électrons s'agitent dans tout les sens et en moyenne la vitesse est nulle. La vitesse du courant d'électrons qui est très faible comme on vient de le voir. Et enfin la vitesse du signal propagé par le courant électrique qui est celle de la lumière (c'est-à-dire environ $300'000'000 \text{ m/s}$). Pour le comprendre, on peut faire l'analogie suivante (figure F.1) :

On pousse le piston 1 très lentement. Presque immédiatement le piston 2 se met en mouvement. Le signal (de poussée) est donc très rapide, mais les molécules d'eau vont, elles, très lentement.

Remarquons que la grande vitesse du signal transmis par l'eau est due à la quasi incompressibilité de l'eau. De même parle-t-on, à la fois par analogie et par extension mathématique, d'une incompressibilité de l'électricité expliquant la vitesse de propagation du signal électrique. Mais attention, cette analogie est limitée au courant de conduction (le courant électrique dans un conducteur). Elle n'est plus valable pour des courants de déplacement des électrons dans des isolants. Cela reste donc une analogie pour ne pas parler de la véritable raison de la propagation du signal qui se situe au niveau du champ électrique. On montre en effet que c'est le champ électrique qui déplace le signal à la vitesse de la lumière.

FIGURE F.1 – Vitesses de propagation



Ligne à haute tension

FIGURE G.1 – Ligne de haute tension
Pylône et isolateurs d’une ligne de 400 kV²⁹



La production de courant par des moteurs électriques est souvent localisée loin des sites où elle est utilisée. La production hydroélectrique, par exemple, se fait à proximité des barrages et elle est ensuite amenée à disposition des consommateurs par des lignes à haute tension. Ces lignes font aujourd’hui partie intégrante du paysage, à tel point qu’on ne les remarque même plus. Elles sont pourtant essentielles à la distribution de l’électricité. Comprendre leur fonctionnement constitue un bon exemple d’utilisation des concepts de tension, courant et résistance.

Pour comprendre la manière dont on distribue l’électricité, il faut mettre en évidence le principal problème de toute distribution : les pertes. Dans le cas de l’électricité, elles sont liées au passage du cou-

rant qui chauffe le conducteur dans lequel il circule. Il s’agit de pertes dues à ce qu’on nomme l’effet Joule (voir équation 3.7) et leur quantité est donnée par l’équation :

$$P = R \cdot i^2$$

On constate que l’expression de ces pertes est fonction de la résistance R du fil et du courant i qui le parcourt. Leur limitation consiste donc à trouver des conducteurs de faible résistance et à abaisser au maximum le courant nécessaire. Or, c’est la loi de Pouillet (voir équation 3.3) qui détermine les facteurs intervenant dans la valeur de la résistance d’un fil :

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

Évidemment, la longueur des fils est fixée par la distance séparant la production de la consommation d’électricité. S’il s’agit toutefois d’une grandeur fixe, le type de production peut l’influencer. Par exemple, la production hydroélectrique est généralement située en montagne et de longues lignes sont nécessaires pour la distribuer. De même pour la production nucléaire qui est toujours isolée des lieux de production, sécurité et proximité de cours d’eau pour le refroidissement obligent. Par contre, l’énergie éolienne peut dans une certaine mesure se situer bien plus près des lieux de consommation. Cependant, les deux facteurs restant qui permettent de minimiser la résistance sont sa résistivité, c’est-à-dire la matière du fil, et sa section.

La matière. Un bon conducteur de résistivité faible est le cuivre : $\rho = 1,68 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$. Malheureusement, il est cher et lourd (8960 kg/m^3). Il n'est donc pas utilisé pour les lignes aériennes. On lui préfère des alliages à base d'aluminium (et acier, silicium, etc) d'une résistivité plus grande $\rho \cong 3 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, mais moins chers et plus légers ($\rho_{\text{acier}} = 7850 \text{ kg/m}^3$ et $\rho_{\text{alu}} = 2700 \text{ kg/m}^3$).

La section. Il existe une limite à l'augmentation de la section d'un conducteur aérien. En effet, les courants alternatifs qui circulent dans ces lignes se déplacent plus facilement au centre du fil qu'à l'extérieur (effet dit "de peau"). Et pratiquement, au-delà de 500 mm^2 de section, c'est-à-dire 2,5 cm de diamètre, il devient avantageux d'utiliser plusieurs fils.

Les conditions données ci-dessus mènent à des résistances de fils de l'ordre de :

$$R = 3 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1000}{500 \cdot 10^{-6}} = 0,06 \Omega/\text{km}$$

La limitation du courant joue aussi un rôle très important pour minimiser les pertes. La loi de Joule montre que celles-ci dépendent du carré du courant électrique et sa limitation est donc absolument nécessaire. Pour cela, on est amené à utiliser de hautes tensions. En effet, pour une puissance donnée, plus la tension est élevée, moins le courant doit être important (voir exercice 46). C'est une conséquence directe de :

$$P = U \cdot I$$

Typiquement, les pertes dans les lignes à très haute tension, 380'000 V par exemple, s'élèvent à moins de 1%, alors qu'elles sont de l'ordre de 6% sur l'ensemble du réseau moyenne et basse tension.

En Suisse, les tensions sont :

pour le réseau de transport de 380 ou 220 kV (très haute tension, pylône d'une hauteur d'environ 60 et 45 m respectivement),

pour le réseau de distribution interrégional de 132 ou 50 kV (haute tension, pylône d'une hauteur d'environ 30 m),

FIGURE G.2 – Isolateur
Éviter les décharges³⁰



pour le réseau de distribution régional de 16 ou 12 kV (moyenne tension, pylône d'une hauteur d'environ 15 m),

pour le réseau de distribution local de 0,4 kV (basse tension, pylône d'une hauteur d'environ 12 m) et

pour le réseau des habitations de 230, voire 12 V (généralement enterré).

Les tensions de distribution sont progressivement abaissées jusqu'au consommateur pour des raisons de sécurité. Les changements de tension se font au moyen de stations de transformation techniquement réalisables grâce à l'utilisation de courant alternatif. En effet, seul ce dernier permet à des transformateurs de changer la tension selon les besoins. Cette opération n'est pas réalisable à l'aide de courant continu. Celui-ci est donc pratiquement très peu utilisé.

Mentionnons finalement le rôle joué par les isolateurs (voir figure G.2) pour la suspension des fils des lignes à haute tension. Il s'agit d'un part d'empêcher le passage du courant dans les pylônes par l'utilisa-

tion de matériau isolant (verre, céramique ou matière synthétique). D'autre part, il s'agit aussi d'éviter que se produisent des décharges à travers l'air entre le fil et son point d'accrochage au pylône. La forme des isolateurs est étudiée pour éviter des champs électriques importants autour d'eux. Ils sont donc construits avec des formes arrondies qui permettent d'éviter tout effet de pointe (voir paragraphe 2.2.8).

Annexe H

Le cyclotron en équations

Essentiellement, le mouvement d'une particule dans un cyclotron est circulaire. Pour trouver le rayon de la trajectoire de la particule en fonction des divers paramètres en jeu, on utilise la force de Lorentz :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

qui, appliquée au cas où $\vec{v} \perp \vec{B}$ donne en grandeur :

$$F = q \cdot v \cdot B$$

Par ailleurs, la deuxième loi de Newton est toujours valable :

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

Et, dans le cas d'un mouvement circulaire uniforme (MCU), on a :

$$a = \frac{v^2}{r}$$

En conséquence de quoi, on peut écrire :

$$q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

Ce qui implique :

$$\boxed{r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}} \quad (\text{H.1})$$

Alors, on peut calculer la période de révolution :

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{q \cdot B}$$

en tirant la vitesse de l'équation du rayon.

Cela implique la fréquence de révolution (qui correspond la fréquence du générateur alternatif) :

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{q \cdot B}{2 \cdot \pi \cdot m}$$

On constate, et cela est très important, que la fréquence est indépendante de la vitesse et du rayon :

$$\nu \neq \nu(v) \text{ et } \nu \neq \nu(r)$$

Ainsi, il sera possible de faire tourner les particules pour tous les demi-tours avec la même fréquence du générateur, malgré l'augmentation de leur vitesse.

On constate aussi que la fréquence dépend du type de particules et du champ magnétique :

$$\nu = \nu\left(\frac{q}{m}\right) \text{ et } \nu = \nu(B)$$

Ainsi, on ne devra utiliser qu'un seul type de particules.

Par ailleurs, les particules sortent du cyclotron quand le rayon de leur trajectoire r est égal au rayon du cyclotron R . A ce moment là, la vitesse de sortie du cyclotron vaut :

$$v_{\text{sortie}} = \frac{q}{m} \cdot B \cdot R$$

en tirant la vitesse de l'expression du rayon et avec $r = R$.

Ainsi, l'énergie cinétique de la particule vaut :

$$E_{cin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{sortie}^2 = \frac{(q \cdot B \cdot R)^2}{2 \cdot m}$$

L'énergie cinétique finale est donc fonction du carré du rayon R et du carré du champ magnétique B . Pour avoir des particules très énergétiques, il faut donc un grand cyclotron (R grand) et un fort champ magnétique (B grand).

Enfin, on peut calculer le nombre fois que la particule passe entre les deux D dans le champ électrique. En effet, à chaque passage dans le champ électrique E , on gagne une énergie qui vaut $q \cdot U$ (voir paragraphe 3.4). Donc le nombre de passages n dans E vaut :

$$n = \frac{E_{cin}}{q \cdot U} = \frac{q \cdot B^2 \cdot R^2}{2 \cdot m \cdot U}$$

Et il est facile d'en déduire le nombre de tours effectués par la particule dans le cyclotron.

Exercices

L'énoncé des exercices ci-dessous comprend leur réponse. Parvenir à celle-ci ne veut pas toujours dire ni que l'exercice est correctement résolu, ni qu'on a bien compris sa solution. C'est pourquoi chacun des ces exercices est entièrement corrigé au paragraphe I.2, page 104.

Deux conseils pour la résolution des exercices : faites un dessin et expliquez-vous le problème en français.

Par soucis de simplification, fera l'approximation d'une accélération terrestre $g \simeq 10 \text{ m/s}^2$.

I.1 Problèmes

I.1.1 Relatifs à la loi de Coulomb

Exercice 1 Quelle est la force exercée par deux particules de charge $q = 12 \text{ mC}$ et $Q = 4 \text{ mC}$ placées à une distance de 3 cm ? Réponse : $4,8 \cdot 10^8 \text{ N}$.

Exercice 2 Deux particules de charge identique exercent l'une sur l'autre une force de 5 mN . Elles sont placées à une distance de 5 cm . Quelle est la charge totale de ces deux particules ? Réponse : $74,6 \text{ nC}$.

Exercice 3 Combien y a-t-il d'électrons excédentaires dans un objet dont la charge est de $-7 \text{ } \mu\text{C}$? Réponse : $4,375 \cdot 10^{13}$ électrons.

Exercice 4 Calculez la force d'attraction électrique qui s'exerce entre le noyau d'un atome de carbone

(numéro atomique : 6 ; masse atomique : 12 unités de masse atomique) et son électron le plus proche, sachant que la distance qui les sépare vaut 1 \AA (10^{-10} m). Réponse : 138 nN .

Exercice 5 Calculez le rapport entre la force électrique exercée par le noyau d'un atome d'hydrogène sur son électron ($r = 10^{-10} \text{ m}$) et la force de gravitation exercée entre ces deux mêmes éléments. Réponse : $2,3 \cdot 10^{39}$.

Exercice 6 A quelle distance faut-il mettre deux électrons pour que la force électrique qui s'exerce entre eux soit égale à leur poids (aux deux électrons réunis) à la surface de la Terre ? Réponse : $3,56 \text{ m}$.

Exercice 7 Deux objets possédant une charge électrique exercent l'un sur l'autre une force de 400 mN . Que vaudra cette force si, en les déplaçant, on diminue leur distance par un facteur neuf ? Réponse : $32,4 \text{ N}$.

Exercice 8 Deux charges, l'une de $q = -9 \text{ } \mu\text{C}$ et l'autre de $Q = 2 \text{ } \mu\text{C}$, se trouvent à une distance de 10 cm . Où peut-on en placer une troisième q' pour qu'elle ne subisse aucune force totale ? Cette charge peut-elle être positive ou négative ? Trouvez la distance qui la sépare de la charge Q . Réponse : $0,0892 \text{ m}$.

Exercice 9 Deux objets ponctuels chacun de charge positive ont une charge totale de $780 \text{ } \mu\text{C}$. Lorsqu'on

les place à une distance de 1,23 m, chacun exerce sur l'autre une force répulsive de 20,4 N. Déterminez la valeur de chaque charge. Réponse : 775,5 μC et 4,5 μC ou 4,4 μC et 775,6 μC .

Exercice 10 La charge totale de deux objets ponctuels de charge positive situés à une distance donnée d l'un de l'autre s'exprime par Q_T . Quelle doit être la valeur de chaque charge pour que la force électrique qui s'exerce entre elles soit maximale ? minimale ?

I.1.2 Relatifs au champ électrique

Exercice 11 Déterminez la grandeur, la direction et le sens du champ électrique en un point situé à 33 cm d'une charge de $40 \cdot 10^{-5}$ C. Réponse : 33 MN/C.

Exercice 12 La force électrique s'exerçant sur une charge de 2 μC vaut $8 \cdot 10^{-4}$ N. Trouvez le champ électrique s'exerçant sur cette charge. Réponse : 400 N/C.

Exercice 13 Trouvez la grandeur, la direction et le sens du champ électrique au milieu d'une ligne qui lie une charge $Q_- = -50 \mu\text{C}$ et une autre $Q_+ = 40 \mu\text{C}$ et qui sont séparées par une distance de 20 cm. Réponse : 81 MN/C.

Exercice 14 Un proton immobile se trouve en suspension à la surface de la Terre et dans un champ électrique \vec{E} . Trouvez la grandeur, la direction et le sens de \vec{E} . Réponse : 10^{-7} N/C.

Exercice 15 Déterminez l'intensité du champ électrique là où un proton subit une accélération $a = 74,3 \cdot 10^3$ m/s². Dessinez le proton puis représentez le vecteur accélération \vec{a} , la force \vec{F} et le champ électrique \vec{E} . Réponse : $7,76 \cdot 10^{-4}$ N/C.

Exercice 16 Un électron se déplace à une vitesse $v_o = 2,6 \cdot 10^6$ m/s en décrivant une trajectoire toujours parallèle à un champ électrique $E = 6,2 \cdot 10^3$ N/C. Au départ, la vitesse et le champ électrique ont mêmes direction et sens.

1. Décrivez le mouvement de l'électron. Fera-t-il demi-tour ? Pourquoi ?

2. Si oui, quelle distance parcourra-t-il avant de le faire ? Sinon, quel est le sens de la force électrique qui s'exerce sur lui ?

3. Si oui, combien de temps s'écoulera-t-il avant qu'il ne revienne à son point de départ ? Sinon, comment faudrait-il mettre le champ pour que l'électron fasse demi-tour ?

Exercice 17 En un certain point de l'espace, une charge $q_1 = 10^{-7}$ C subit une force $F_1 = 10^{-2}$ N. Trouvez le champ électrique E en ce point et la force F_2 que subirait une charge $q_2 = 10^{-8}$ C si elle était placée au même point. Réponse : 10^5 N/C et 10^{-3} N.

Exercice 18 Deux charges ponctuelles de 4 et 6 μC sont situées à quelque distance l'une de l'autre. Elles exercent l'une sur l'autre des forces de 0,4 N.

1. Calculez le champ électrique produit par la première à l'endroit où se trouve la seconde. Réponse : 66'666 N/C.

2. Calculez le champ électrique produit par la seconde à l'endroit où se trouve la première. Réponse : 100'000 N/C.

Exercice 19 Deux charges sont placées à une distance de 75 cm l'une de l'autre. Elles ont même valeur. Calculez le champ total entre les deux charges à 25 cm de l'une sachant que la charge de l'autre est de 10^{-6} C. Réponse : 108 kN/C.

Exercice 20 On place trois charges positives identiques sur un plan. Dessinez en deux points différents du plan le vecteur champ électrique total.

Exercice 21 Une charge $q = 1 \mu\text{C}$ est accélérée de 3 m/s² par un champ électrique créé par une autre charge Q . Si la masse de q vaut 1 g et qu'elle se trouve à une distance de 2 m de Q , trouvez le champ électrique sur q , puis situez et calculez Q . Réponse : 1,33 μC .

I.1.3 Relatifs à la sécurité électrique

Exercice 22 Trouvez à l'aide d'un multimètre (plus précisément d'un ohmmètre) la résistance des éléments de la table I.1 :

| Élément | Résistance (Ω) |
|-------------------|-------------------------|
| Fil électrique | |
| Corps humain | |
| Semelle plastique | |
| Stylo feutre | |
| Crayon de papier | |
| Crayon de couleur | |
| Bois sec (2 cm) | |
| Tâteur | |
| Verre | |

TABLE I.1 – Résistances diverses

Exercice 23 Un oiseau pose une patte sur une ligne haute tension. Que se passe-t-il ? Que se passe-t-il s'il y pose les deux pattes ? Que se passerait-il s'il posait l'autre patte sur un autre conducteur connecté à la terre ?

Exercice 24 Quel est le courant que reçoit une personne qui se trouve dans son bain ($R = 1500 \Omega$) et dont le sèche-cheveux branché sur la prise 230 V tombe dans le bain ? Quels sont ses effets ? Est-ce important que l'appareil soit enclenché ? Expliquez. Réponse : 153,4 mA.

Exercice 25 Y a-t-il un risque de recevoir un choc électrique avec une batterie de voiture (12 V) ? Quels types de risques sont possibles avec une telle batterie ?

Exercice 26 Pourquoi est-il particulièrement important de mettre à la terre les appareils électriques lorsqu'on les utilise à l'extérieur ou dans la cave ?

Exercice 27 Une personne tombe par terre électrocutée avec un fil électrique à la main. Que faites-vous ?

Exercice 28 Un enfant introduit un crayon de papier dans une borne de la prise électrique. Est-ce dangereux ? Et un crayon de couleur ?

Exercice 29 Expliquez en détail comment fonctionne un tâteur et en particulier pourquoi la personne qui l'utilise ne doit pas craindre une électrocution.

Exercice 30 À partir de quel courant un disjoncteur à courant de défaut (FI) déclenche-t-il ? Avec un tel dispositif, y a-t-il encore des risques d'électrocution ? Dans les maisons modernes, pour quelles pièces pose-t-on des FI ?

Exercice 31 On a alimenté un lave-linge avec un cordon à deux fils. Pouvez-vous prévoir les risques d'accidents ? Si le fil de terre était branché, est-ce que le risque d'électrocution serait éliminé ?

Exercice 32 Lors d'un violent orage, un câble haute tension est tombé sur un autocar. Que proposez-vous pour les secours ?

I.1.4 Relatifs aux loi d'Ohm et de Pouillet, à la puissance et à l'énergie

Exercice 33 À partir des résistances de l'exercice 22, déterminez le courant qui traverse chacun de ces éléments s'il se trouve placé entre la phase (230 V) et la terre (0 V).

Exercice 34 Trouvez la puissance des appareils domestiques de la table I.2 :

| Appareils | Puissance (W) |
|------------------------------|---------------|
| Ampoule normale | |
| Ampoule basse consommation | |
| Sèche cheveux | |
| Baladeur | |
| Aspirateur | |
| Chaîne HiFi | |
| Ordinateur | |
| Cuisinière | |
| Four à microondes | |
| Machine à laver la vaisselle | |
| Machine à laver le linge | |
| Sèche linge | |

TABLE I.2 – Puissances diverses

Exercice 35 Calculez le courant qui passe à travers une ampoule de 4 W reliée à une source de tension de 12 V. Réponse : 333 mA.

FIGURE I.1 – Une batterie



Exercice 36 Quelle est la consommation de puissance d'un transformateur qui requiert un courant de 400 mA sous une tension de 9 V ? Réponse : 3,6 W.

Exercice 37 Quelle tension maximale peut-on appliquer à une résistance de 800 Ω dont la puissance maximale est d'un quart de watt (petites résistances vendues très bon marché dans le commerce) ? Réponse : 14,14 V.

Exercice 38 Toute la nuit (7 h), on laisse une lampe de 200 W allumée dans une pièce. Quel en sera le coût si le prix de l'électricité s'élève à 20 cts le kilowatt-heure ? Réponse : 28 cts.

Exercice 39 Trouvez la quantité d'énergie emmagasinée dans une batterie (voir figure I.1) automobile de 12 V et 45 Ah entièrement chargée. Réponse : 0,54 kWh.

Exercice 40 Combien de temps la batterie entièrement chargée de l'exercice 39 permettra-t-elle à une ampoule de 60 W de briller ? Réponse : 9 h.

Exercice 41 À 20 cts le kWh, combien devra-t-on payer si on laisse la lumière (25 W) du garage allumée toute la journée (14 h) pendant un an. Réponse : 25,55 frs.

Exercice 42 Un automobiliste oublie d'éteindre les feux de sa voiture. Si les deux phares avant utilisent chacun 40 W, les clignoteurs 2 W au total et chaque

feu arrière 6 W, combien de temps une batterie de 12 V les alimentera-t-elle si sa charge vaut 40 Ah ? On suppose que chaque ampoule est à une tension de 12 V. Réponse : 5,1 h.

Exercice 43 Un radiateur électrique d'une puissance de 2000 W fonctionne sous une tension de 230 V. S'il est constitué de fer ($\rho_{fer} = 9,7 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$) et qu'il mesure 1500 m de long, quel doit être son diamètre ? Réponse : 2,65 mm.

Exercice 44 Un radiateur de 3,3 kW fonctionne trois heures par jour, cinq lampes de 100 W fonctionnent 4 h par jour, une cuisinière de 3 kW fonctionne 1,1 h par jour et différents autres appareils consomment 1,8 kWh par jour. Si l'électricité coûte 20 cts le kWh, quel sera le coût d'un fonctionnement durant trente jours ? Combien de kg de charbon (produisant 7000 kcal/kg) une centrale électrique d'un rendement de 35% doit-elle brûler pour une utilisation pendant un an ? Réponses : 102.- et 2178,1 kg.

Exercice 45 Calculez le rendement d'un moteur électrique de 0,4 CV (cheval-vapeur) parcouru par un courant de 4,5 A provenant d'une source de tension de 230 V (1 CV = 736 W). Réponse : 28,4 %.

Exercice 46 Une centrale électrique fournit 600 kW à une ville à travers une ligne électrique ayant une résistance de 4 Ω . Trouvez la puissance économisée si l'électricité est transportée sous une tension de 50'000 V plutôt que de 15'000 V. Réponse : 5824 W.

Exercice 47 Le diamètre des fils électriques qui parcourent une maison est déterminé par la protection contre l'incendie. Ils doivent être assez épais pour ne pas trop chauffer. Quel rayon doit avoir un fil de cuivre ($\rho_{cuivre} = 1,68 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$) destiné à transporter un courant maximal de 10 A sans produire plus de 1 W de chaleur par mètre de longueur ? Réponse : $\simeq 1$ mm

I.1.5 Relatifs au magnétisme

La valeur de la composante horizontale du champ magnétique terrestre est donnée au paragraphe 4.2.2.

Exercice 48 Un fil droit de 20 m de long est parcouru par un courant de 10 A. Il est orienté nord-sud et le courant va vers le sud. Quelle est la force de Laplace qu'il subit (direction, sens et grandeur)? Même question s'il était orienté est-ouest, le courant se déplaçant vers l'ouest? Réponses : 0 N et 0,00432 N.

Exercice 49 Les fils d'une ligne à haute tension orientée à 30° dans le sens contraire des aiguilles d'une montre par rapport à la direction est-ouest conduisent un courant total de 100 A vers l'est. Si la hauteur des pylônes est de 15 m, la distance les séparant de 200 m et le nombre de fils qu'ils supportent de cinq, quelle est la force magnétique que subit chaque fil et la force totale entre deux pylônes (le courant dans chaque fil est le même)? Réponses : 0,0748 N et 0,374 N.

Exercice 50 Un fil droit est parcouru par un courant vertical vers le haut. Dessinez, vu de dessus, le fil et le champ magnétique à une distance d au nord, au sud, à l'est et à l'ouest de celui-ci (sens et direction). Si on place à la même distance d au nord du fil un autre fil droit vertical, parcouru par un courant allant vers le haut, quelle serait (sens et direction) la force magnétique exercée sur lui à cet endroit?

Exercice 51 Un fil horizontal de 2 m, supposé sans masse, est parcouru par un courant de 10 A. Il est placé dans un champ magnétique horizontal de 0,1 T qui lui est perpendiculaire. Quel poids doit-on lui suspendre pour compenser la force de Laplace. A quelle masse cela correspond-il? Réponses : 2 N et 200 g.

Exercice 52 Un fil de 10 cm est aligné selon l'axe x . Il est parcouru par un courant de 100 mA dans le sens positif de l'axe x . Il est placé dans un champ magnétique de $100 \mu\text{T}$ situé dans le plan xz faisant un angle $\alpha = 30^\circ$ avec l'axe x , du côté positif de l'axe z . Trouvez la direction, le sens et la valeur de la force de Laplace qui s'exerce sur lui. Réponse : $5 \cdot 10^{-7}$ N.

Exercice 53 On place un fil droit dans le plan et par le centre d'une spire. Choisissez pour le fil et la spire deux sens du courant les parcourant. Puis, indiquez quelle est la force (direction et sens) que le fil exerce sur la spire aux points les plus éloignés de celui-ci.

Enfin indiquez quelle est la force que la spire exerce sur le fil au centre de celle-ci.

Exercice 54 Un avion se déplaçant 50 km/h plus rapidement que la vitesse du son, porte une charge de 10 C en raison des frottements qui s'exercent sur lui. Il vole en direction nord-est à 40° vers le nord depuis l'est. Quelle est la force de Lorentz qui s'exerce sur lui (direction, sens et grandeur)? Réponse : 0,059 N.

Exercice 55 Un électron se déplace à 1% de la vitesse de la lumière ($c = 300'000$ km/s) perpendiculairement à un champ magnétique de 5 nT. Quelle est la valeur de la force de Lorentz qui s'exerce sur lui? Réponse : $2,4 \cdot 10^{-21}$ N.

Exercice 56 À un instant donné, un proton se déplaçant à la vitesse de $108 \cdot 10^6$ km/h est soumis à une force de Lorentz de 0,6 pN. Le champ magnétique dans lequel il est plongé a une valeur de 0,9 T. Quel est l'angle α entre la vitesse du proton et le champ magnétique? Réponse : 8° .

Exercice 57 Un éclair frappe une voiture. Parti d'un nuage situé horizontalement à 200 m d'elle et à une hauteur de 100 m, il s'est déplacé en ligne droite jusqu'à elle. Le courant qu'il a produit valant $10'000$ A, quelle est la force magnétique qui s'exerce sur lui (On suppose le champ magnétique terrestre horizontal, parallèle à la projection sur le sol de l'éclair, de même sens que lui et d'une valeur de $B = 21,594 \cdot 10^{-6}$ T)? Réponse : 21,6 N.

Exercice 58 A la sortie d'un accélérateur de particules, on dévie vers le haut des électrons se déplaçant horizontalement à la vitesse de 1 km/s. Quelle doit être la direction du champ magnétique pour produire cette déviation? En supposant la vitesse initiale et le champ magnétique perpendiculaires, calculez sa grandeur si la force magnétique qui s'exerce sur l'électron vaut 1 fN. Réponse : 6,25 T.

Exercice 59 On accélère des électrons à l'aide d'un dispositif électrostatique raccordé à une source de tension $U = 1000$ V. Quelle est leur vitesse de sortie? Réponse : $18'752$ km/s.

Exercice 60 Accélééré par le dispositif de l'exercice 59, un faisceau d'électrons est dévié par un champ magnétique de 1 mT perpendiculaire à la vitesse des électrons. Quelle est la grandeur de la force qui s'exerce sur les électrons? Si on place un écran à $L = 3$ cm de la sortie de l'accélérateur, de quelle distance d seront-ils déviés par rapport à l'axe du faisceau non dévié? Réponses : $3 \cdot 10^{-15}$ N et 4,3 mm.

Exercice 61 Un électron se déplace à une vitesse \vec{v} donnée perpendiculairement à un champ magnétique \vec{B} donné. Exprimez la force magnétique \vec{F} qui s'exerce sur lui. Quel doit être le champ électrique (grandeur, direction et sens) \vec{E} nécessaire à annuler la force magnétique. Quelle sera alors la trajectoire de l'électron? Comment pourriez-vous réaliser sur ce principe un sélecteur de vitesse pour des particules de vitesse aléatoire?

Exercice 62 On envoie des particules inconnues dans un spectrographe de masse. A la sortie d'un sélecteur de vitesse qui amène les particules à une vitesse de 500'000'000 km/h, ils entrent dans un champ magnétique $B = 10$ mT qui leur fait faire un demi-tour. On mesure alors le rayon de leur trajectoire qui vaut $R = 1$ cm. Cela peut-il être des électrons?

I.2 Solutions

1 La force se calcule dans les unités du SI. On a donc :

$$q = 12 \text{ mC} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ C}$$

$$Q = 4 \text{ mC} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ C}$$

$$d = 3 \text{ cm} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Ainsi, on peut calculer la force comme suit :

$$\begin{aligned} F &= k \cdot \frac{q \cdot Q}{d^2} \\ &= 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{12 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{(3 \cdot 10^{-2})^2} \\ &= 4,8 \cdot 10^8 \text{ N} \end{aligned}$$

2 Dans les unités du SI, on a :

$$F = 5 \text{ mN} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

$$d = 5 \text{ cm} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Par ailleurs, les deux charges sont identiques et on peut poser : $q = Q$. On peut écrire :

$$\begin{aligned} 5 \cdot 10^{-3} &= 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{q \cdot q}{(5 \cdot 10^{-2})^2} \Rightarrow \\ 9 \cdot 10^9 \cdot q^2 &= 5 \cdot 10^{-3} \cdot (5 \cdot 10^{-2})^2 \Rightarrow \\ q^2 &= \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot (5 \cdot 10^{-2})^2}{9 \cdot 10^9} \\ &= 1,38 \cdot 10^{-15} \Rightarrow \\ q &= 3,73 \cdot 10^{-8} = 37,3 \text{ nC} \end{aligned}$$

Ainsi, la charge totale de ces particules est :

$$\sum q = q + Q = 2 \cdot q = 74,6 \text{ nC}$$

3 Un problème identique serait : combien y a-t-il de pommes de 2 kg dans un panier de pommes d'une masse totale de 24 kg? Évidemment, on divise la masse totale des pommes par la masse d'une pomme : $24/2 = 12$ pommes.

Dans notre problème, le panier d'électron a une charge de $7\mu\text{C}$ soit $7 \cdot 10^{-6}$ C et chaque électron une charge, dite élémentaire, de $1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Ainsi, le nombre d'électrons vaut :

$$n = \frac{7 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 4,375 \cdot 10^{13} \text{ electrons}$$

4 Deux charges, considérées comme ponctuelles, se trouvent ici en présence. L'une est le noyau, constitué de six protons, et dont la charge vaut donc $Q_{\text{noyau}} = 6 \cdot e$, e étant la charge élémentaire, c'est-à-dire la charge d'un proton. L'autre est l'électron, dont la charge vaut $q_{\text{électron}} = e$, en valeur absolue.

Ainsi, la force qui s'exerce entre ces deux charges vaut :

$$F = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{(10^{-10})^2} \\ = 1,38 \cdot 10^{-7} \text{ N} = 138 \text{ nN}$$

5 Pour la force électrique, on a :

$$F_e = k \cdot \frac{q_{\text{proton}} \cdot q_{\text{électron}}}{d^2} \\ = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(10^{-10})^2} \\ = 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

Pour la force de gravitation, on a :

$$F_g = G \cdot \frac{m_{\text{proton}} \cdot m_{\text{électron}}}{d^2} \\ = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{(10^{-10})^2} \\ = 10^{-47} \text{ N}$$

Ainsi, le rapport vaut :

$$r = \frac{2,3 \cdot 10^{-8}}{10^{-47}} = 2,3 \cdot 10^{39}$$

Ce qui signifie que la force électrique est $2,3 \cdot 10^{39}$ fois plus grande que la force gravifique ! C'est-à-dire que la force électrique est une force bien plus forte que la force gravifique.

6 Commençons par déterminer le poids des deux électrons. À la surface de la Terre, on a :

$$P = m \cdot g = (m_e + m_e) \cdot g = 2 \cdot m_e \cdot g$$

Ainsi, la force électrique qui s'exerce entre les deux électrons s'écrit :

$$F = k \cdot \frac{e \cdot e}{d^2} = 2 \cdot m_e \cdot g \Rightarrow$$

$$9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{d^2} = 2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10 \Rightarrow$$

$$d^2 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10} = 12,66 \Rightarrow$$

$$d = 3,56 \text{ m}$$

7 La difficulté de ce problème réside dans le fait qu'on ne connaît ni la charge q ou Q de chaque objet, ni la distance d qui les sépare. Mais comme la force qui s'exerce entre eux est connue, on peut écrire :

$$F = 400 \text{ mN} = 400 \cdot 10^{-3} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{q \cdot Q}{d^2}$$

Par ailleurs, sans que q et Q ne changent, lorsque la distance d entre les deux charges est diminuée d'un facteur neuf, soit pour la nouvelle distance $d' = d/9$, on peut écrire pour la nouvelle force F' :

$$F' = k \cdot \frac{q \cdot Q}{d'^2} = k \cdot \frac{q \cdot Q}{(\frac{d}{9})^2} = k \cdot \frac{q \cdot Q}{\frac{d^2}{81}} \\ = k \cdot \frac{q \cdot Q}{d^2} \cdot 81 = 400 \cdot 10^{-3} \cdot 81 = 32,4 \text{ N}$$

L'avant dernière égalité étant justifiée par la valeur de F .

Remarquons enfin que le problème contient formellement quatre inconnues (F' , q , Q et d) pour deux équations. On ne devrait donc pas pouvoir résoudre. Mais comme on ne cherche ni q , ni Q , ni d , on peut considérer le groupe $q \cdot Q/d^2$ comme une seule inconnue. Ainsi, on a alors un système de deux équations à deux inconnues et une solution est possible.

8 Chacune des deux charges q et Q exerce une force sur q' . Pour que cette dernière ne subisse aucune force, il faut donc que la somme vectorielle des deux forces exercées par q et Q soit nulle. Pour cela, il faut que :

- les deux forces soient parallèles,
- qu'elles soient opposées et
- qu'elles aient une valeur égale.

Pour que les deux forces soient parallèles, il faut que les trois charges soient sur une même ligne. Sur celle-ci, on pourrait donc placer q' soit entre les deux charges q et Q , soit à l'extérieur du côté de q , soit à l'extérieur du côté de Q .

Mais, pour que les deux forces soient opposées, on ne peut placer q' au centre, car alors les deux forces auraient même sens, en raison du signe opposé des deux charges q et Q .

Finalement, on doit placer q' à l'extérieur des deux charges, du côté de Q , car la distance entre q et q' est plus grande que celle entre Q et q' . En effet, la dépendance en $1/r^2$ de la force, qui fait diminuer la force lorsqu'on augmente la distance, est compensée par sa proportionnalité dans la valeur des charges en jeu. Ainsi, comme q est la plus grande charge (en valeur absolue), il faut la placer plus loin que Q dont la valeur est plus petite.

Tout cela est valable quel que soit le signe de q' qui ne fait que changer le sens des forces qui s'exercent.

Pour déterminer la distance d qui sépare Q de q' , on pose (avec 10 cm soit 0,1 m) :

$$\begin{aligned} F_{q \rightarrow q'} &= F_{Q \rightarrow q'} \Rightarrow \\ k \cdot \frac{9 \cdot 10^{-6} \cdot q'}{(0,1 + d)^2} &= k \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot q'}{d^2} \Rightarrow \\ \frac{9}{(0,1 + d)^2} &= \frac{2}{d^2} \Rightarrow \\ 9 \cdot d^2 &= 2 \cdot (0,1 + d)^2 \Rightarrow \\ 9 \cdot d^2 &= 2 \cdot (0,01 + 0,2 \cdot d + d^2) \Rightarrow \\ 9 \cdot d^2 &= 0,02 + 0,4 \cdot d + 2 \cdot d^2 \Rightarrow \end{aligned}$$

Soit finalement l'équation du second degré :

$$7 \cdot d^2 - 0,4 \cdot d - 0,02 = 0$$

La solution est alors donnée par :

$$\begin{aligned} d &= \frac{0,4 \pm \sqrt{(-0,4)^2 - 4 \cdot 7 \cdot (-0,02)}}{2 \cdot 7} \\ &= \frac{0,4 \pm 0,849}{14} \\ &= \begin{cases} 0,0892 \text{ m} & q' \text{ à l'extérieur} \\ -0,0321 \text{ m} & q' \text{ à l'intérieur} \end{cases} \end{aligned}$$

Comme on a choisi d'écrire la distance entre q et q' comme $(0,1 + d)$ avec q' à l'extérieur des deux charges q et Q , la distance d est positive si la charge q' est à l'extérieur. C'est donc la solution positive qu'il faut

retenir. L'autre solution correspond au cas où q' serait entre les deux charges. En effet, ce cas est possible, car la condition mathématique de départ impose seulement que les deux forces soient égales et non aussi qu'elles soient opposées. Ainsi, la solution négative correspond-elle au cas où la charge q' serait à l'intérieur des deux charge et subirait deux forces égales mais de même sens. Il faut la rejeter.

9 On a simplement :

$$\begin{aligned} q + Q &= 780 \mu\text{C} = 780 \cdot 10^{-6} \text{C} \Rightarrow \\ q &= 780 \cdot 10^{-6} - Q \end{aligned}$$

Ainsi, on peut écrire :

$$\begin{aligned} F &= 20,4 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{q \cdot Q}{1,23^2} \\ &= 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(780 \cdot 10^{-6} - Q) \cdot Q}{1,23^2} \Rightarrow \\ 20,4 &= \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 780 \cdot 10^{-6} \cdot Q - 9 \cdot 10^9 \cdot Q^2}{1,23^2} \end{aligned}$$

Et donc :

$$20,4 \cdot 1,23^2 = 7,02 \cdot 10^6 \cdot Q - 9 \cdot 10^9 \cdot Q^2$$

Ce qui donne l'équation du second degré suivante :

$$9 \cdot 10^9 \cdot Q^2 - 7,02 \cdot 10^6 \cdot Q + 30,86 = 0$$

dont la solution est donnée par :

$$\begin{aligned} Q &= \\ &= \frac{7,02 \cdot 10^6 \pm \sqrt{(7,02 \cdot 10^6)^2 - 4 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 30,86}}{2 \cdot 9 \cdot 10^9} \\ &= \frac{7,02 \cdot 10^6 \pm 6,94 \cdot 10^6}{18 \cdot 10^9} = \begin{cases} 775,5 \mu\text{C} \\ 4,4 \mu\text{C} \end{cases} \end{aligned}$$

Soit, pour l'autre charge :

$$q = 780 - Q = 780 - \begin{cases} 775,5 \\ 4,4 \end{cases} = \begin{cases} 4,5 \mu\text{C} \\ 775,6 \mu\text{C} \end{cases}$$

10 Ce problème est partiellement algébrique, en ce sens qu'on considère Q_T comme connu. La solution en sera donc fonction. Évidemment, on peut écrire :

$$q + Q = Q_T \Rightarrow Q = Q_T - q$$

La force qui s'exerce entre les charges s'écrit alors :

$$F = k \cdot \frac{q \cdot Q}{d^2} = k \cdot \frac{q \cdot (Q_T - q)}{d^2}$$

La force F est donc une fonction de q :

$$F = F(q)$$

C'est donc en annulant la dérivée de cette fonction qu'on en obtiendra la valeur maximale :

$$F(\hat{q}) \text{ max ou min si } \frac{d}{dq} F(\hat{q}) = 0$$

La fonction qu'il faut dériver est donc :

$$F(q) = \frac{k \cdot Q_T}{d^2} \cdot q - \frac{k}{d^2} \cdot q^2$$

Sa dérivée est :

$$\frac{dF(q)}{dq} = \frac{k \cdot Q_T}{d^2} - \frac{k}{d^2} \cdot 2 \cdot q$$

En annulant cette dérivée, on trouve alors la valeur de \hat{q} pour laquelle la force est maximale ou minimale :

$$\begin{aligned} \frac{k \cdot Q_T}{d^2} - \frac{k}{d^2} \cdot 2 \cdot \hat{q} &= 0 \Rightarrow \\ Q_T - 2 \cdot \hat{q} &= 0 \end{aligned}$$

Soit finalement :

$$\hat{q} = \frac{Q_T}{2} = Q$$

11 Le champ est produit par la charge $Q = 40 \cdot 10^{-5} \text{ C} = 400 \mu\text{C}$. Il faut le déterminer à une distance $d = 33 \text{ cm}$ d'elle. La direction et le sens sont donnés à la figure I.2. La grandeur se calcule comme suit :

$$\begin{aligned} E &= 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{40 \cdot 10^{-5}}{0,33^2} \\ &= 33'057'851 \text{ N/C} = 33 \text{ MN/C} \end{aligned}$$

12 Nous avons ici à déterminer un champ qui exerce une force donnée $F = 8 \cdot 10^{-4} \text{ N}$ sur une charge $q = 2 \mu\text{C} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$. Comme $q > 0$, la relation :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

FIGURE I.2 – Champ à 33 cm

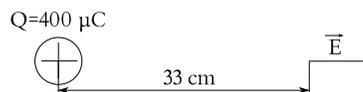
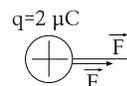


FIGURE I.3 – Force et champ



implique que le champ est dans la même direction et le même sens que la force, comme indiqué sur la figure I.3. Sa valeur est ainsi :

$$E = \frac{F}{q} = \frac{8 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-6}} = 400 \text{ N/C}$$

13 Le champ total est la somme vectorielle des champs \vec{E}_- et \vec{E}_+ respectivement créés par les charges Q_- et Q_+ . On peut en calculer la valeur comme suit :

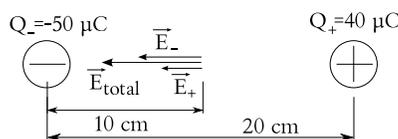
$$E_- = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{50 \cdot 10^{-6}}{0,1^2} = 45 \text{ MN/C}$$

$$E_+ = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{40 \cdot 10^{-6}}{0,1^2} = 36 \text{ MN/C}$$

Comme ces champs sont dans la même direction et le même sens (voir figure I.4), la valeur du champ total est la somme arithmétique de E_- et E_+ :

$$E_{tot} = E_- + E_+ = 45 + 36 = 81 \text{ MN/C}$$

FIGURE I.4 – Champ entre deux charges



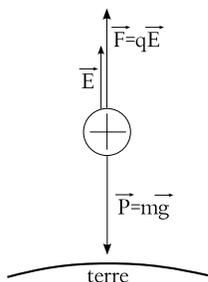
14 Pour que le proton soit en suspension, il faut que son poids P soit compensé par la force électrique F

produite par le champ \vec{E} . Comme la charge du proton est positive, le champ \vec{E} est dans le même sens que la force \vec{F} , c'est-à-dire opposé au poids, comme le montre la figure I.5. Numériquement, on a alors :

$$q \cdot E = m \cdot g \Rightarrow$$

$$E = \frac{m \cdot g}{q} = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 10}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 10^{-7} \text{ N/C}$$

FIGURE I.5 – Proton en suspension



15 C'est la force \vec{F} qui s'exerce sur le proton qui produit son accélération \vec{a} . Comme la masse m du proton est positive, la deuxième loi de Newton $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ implique que la force \vec{F} a même direction et même sens que l'accélération. Comme $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ et que la charge q du proton est positive, le champ \vec{E} a même direction et même sens que la force. Donc, comme le montre la figure I.6, les trois vecteurs ont même direction et même sens.

La grandeur du champ électrique E est donnée par :

$$F = m \cdot a = q \cdot E \Rightarrow$$

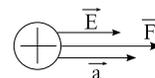
$$E = \frac{m \cdot a}{q} = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 74,3 \cdot 10^3}{1,6 \cdot 10^{-19}}$$

$$= 7,76 \cdot 10^{-4} \text{ N/C}$$

16 Traitons chaque point successivement.

1. Comme $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ et que la charge q de l'électron est négative, la force électrique \vec{F} est de

FIGURE I.6 – Proton accéléré



sens opposé au champ. Mais comme le champ est dans le même sens que la vitesse initiale, la force est opposée à celle-ci. Ainsi, l'électron va ralentir, puis d'arrêter et repartir en arrière. Il fera donc demi-tour.

2. Comme :

$$F = e \cdot E = c^{ste} = m \cdot a \Rightarrow$$

$$a = c^{ste} = \frac{e \cdot E}{m} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,2 \cdot 10^3}{9,1 \cdot 10^{-31}}$$

$$= 1,1 \cdot 10^{15} \text{ m/s}^2$$

L'accélération est constante et de valeur déterminée. C'est en fait une décélération et sa valeur est donc $a = -1,1 \cdot 10^{15} \text{ m/s}^2$. C'est un MRUA et on peut écrire :

$$v_f^2 = v_i^2 + 2 \cdot a \cdot d \Rightarrow$$

$$0^2 = (2,6 \cdot 10^6)^2 - 2 \cdot 1,1 \cdot 10^{15} \cdot d \Rightarrow$$

$$d = \frac{(2,6 \cdot 10^6)^2}{2 \cdot 1,1 \cdot 10^{15}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 3 \text{ mm}$$

3. On a encore :

$$v_f = a \cdot t + v_i$$

avec, aux instants considérés :

$$v_i > 0, v_f < 0 \text{ et } v_i = v_f$$

Ainsi, on peut écrire en se rappelant qu'on a une décélération :

$$-v_i = a \cdot t + v_i \Rightarrow$$

$$-2 \cdot v_i = a \cdot t \Rightarrow$$

$$t = \frac{-2 \cdot v_i}{a} = \frac{-2 \cdot 2,6 \cdot 10^6}{-1,1 \cdot 10^{15}}$$

$$= 4,73 \cdot 10^{-9} \text{ s} = 4,73 \text{ ns}$$

17 On a simplement :

$$E = \frac{F_1}{q_1} = \frac{10^{-2}}{10^{-7}} = 10^5 \text{ N/C}$$

et pour la force :

$$F_2 = q_2 \cdot E = 10^{-8} \cdot 10^5 = 10^{-3} \text{ N}$$

18 Si on pose $q_1 = 4 \mu\text{C}$ et $q_2 = 6 \mu\text{C}$, \vec{E}_1 le champ électrique créé par la charge q_1 , \vec{E}_2 le champ électrique créé par la charge q_2 , $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ la force créée par q_1 qui s'exerce sur q_2 et $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$ la force créée par q_2 qui s'exerce sur q_1 , on a la situation présentée sur la figure I.7. Par la troisième loi de Newton, on peut affirmer que :

$$F_{1 \rightarrow 2} = F_{2 \rightarrow 1} = F = 0,4 \text{ N}$$

Ainsi, chaque charge exerce sur l'autre la même force.

Mais, comme la valeur de chaque charge est différente, le champ électrique produit l'est aussi. Le champ électrique produit par la charge q_1 exerce son action, la force F , sur la charge q_2 . De la même manière, le champ produit par la charge q_2 exerce son action, l'autre force F , sur la charge q_1 . Ainsi, par $F = q \cdot E$, on a :

$$E_1 = \frac{F}{q_2} = \frac{0,4}{6 \cdot 10^{-6}} = 66'666 \text{ N/C}$$

$$E_2 = \frac{F}{q_1} = \frac{0,4}{4 \cdot 10^{-6}} = 100'000 \text{ N/C}$$

FIGURE I.7 – Une charge et l'autre



19 Les deux charges ont même valeur. On peut donc calculer le champ électrique à 25 cm de l'une par :

$$E_{25} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{0,25^2} = 144 \text{ kN/C}$$

On peut aussi calculer le champ à $75 - 25 = 50$ cm de l'autre par :

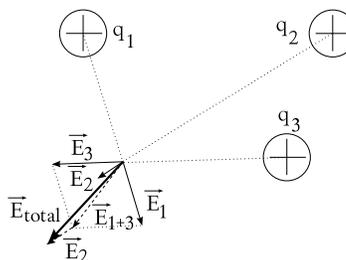
$$E_{50} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{0,5^2} = 36 \text{ kN/C}$$

Les deux charges étant positives, chacune d'elle crée un champ de sens opposé à l'autre. Ce champ pointe à l'opposé de la charge qui l'a créé. Le plus grand est celui créé par la charge à 25 cm. Le champ résultant pointe donc vers la charge à 50 cm et sa valeur est :

$$E_{total} = E_{25} - E_{50} = 144 - 36 = 108 \text{ kN/C}$$

20 Pour ne pas surcharger le dessin, la figure I.8 ne présente le champ total issu des trois charges qu'en un seul point. Attention, les lignes de construction sont importantes pour les champs issus de chaque charge et pour la construction des sommes vectorielles issues de ces champs.

FIGURE I.8 – Champ produit par trois charges



21 Par $F = m \cdot a$, on trouve la force nécessaire à accélérer la charge q :

$$F = m \cdot a = 10^{-3} \cdot 3 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

Le champ électrique nécessaire pour produire cette force est alors :

$$E = \frac{F}{q} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-6}} = 3000 \text{ N/C}$$

La charge nécessaire pour créer ce champ électrique

est finalement donnée par :

$$E = k \cdot \frac{Q}{d^2} \Rightarrow$$

$$Q = E \cdot \frac{d^2}{k} = 3000 \cdot \frac{2^2}{9 \cdot 10^9}$$

$$= 1,33 \cdot 10^{-6} \text{ C} = 1,33 \text{ } \mu\text{C}$$

22 Il faut relever que les valeurs indiquées dans la table I.3 sont indicatives et dépendent parfois de l'état des éléments utilisés pour faire la mesure (l'humidité par exemple).

| Élément | Résistance (Ω) |
|-------------------|-------------------------|
| Fil électrique | ~ 10 |
| Corps humain | $\sim 100'000$ |
| Semelle plastique | $\sim 10'000'000$ |
| Stylo feutre | $> 10'000'000$ |
| Crayon de papier | ~ 30 |
| Crayon de couleur | $> 1'000'000$ |
| Bois sec (2 cm) | $> 1'000'000$ |
| Tâteur | $> 100'000'000$ |
| Verre | $> 100'000'000$ |

TABLE I.3 – Résistances diverses

23 Si l'oiseau pose une seule patte sur le fil, comme ce dernier a une résistance très faible (pour éviter de dissiper de la chaleur et perdre ainsi de l'énergie inutilement), l'essentiel du courant va passer dans le fil. Comme la résistance de l'oiseau est en général assez importante, la fraction de courant qui va passer dans la patte ne lui est pas dangereuse.

De la même manière, la résistance du fil étant très faible par rapport à celle de l'oiseau et la tension entre elles peu importante, s'il pose les deux pattes, même si une partie du courant peut passer à travers son corps, celui-ci sera trop faible pour que l'oiseau soit en danger.

Par contre, s'il pose l'autre patte sur un conducteur connecté à la terre, la différence de potentiel, c'est-à-dire la tension entre ses deux pattes est une haute tension et malgré une résistance du corps de l'oiseau importante, la décharge est fatale.

Il faut retenir de cela, qu'un parachutiste accroché par accident à une ligne haute tension ne risque rien tant qu'il n'est pas en contact avec la terre (éventuellement par l'intermédiaire de l'échelle de ses sauveteurs). Avant de lui venir en aide, il est donc impérativement nécessaire de couper le courant dans la ligne.

24 La loi d'Ohm donne :

$$U = R \cdot I \Rightarrow$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{230}{1500} = 0,1534 \text{ A} = 153,4 \text{ mA}$$

Ce courant est mortel. Il y a brûlures importantes et arrêt cardiaque.

Même si l'appareil n'était pas enclenché, mais seulement branché à la prise murale, l'eau, en s'infiltrant à l'intérieur, permettrait le passage du courant et l'électrocution persisterait. Pour éviter le danger, il faudrait débrancher l'appareil de la prise murale.

25 Supposons une personne de résistance corporelle faible $R = 100 \text{ k}\Omega$. La loi d'Ohm donne alors :

$$U = R \cdot I \Rightarrow$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{100'000} = 0,00012 \text{ A} = 0,12 \text{ mA}$$

Ce courant n'est absolument pas dangereux. Attention pourtant aux risques de brûlures par échauffement du fil lors du démarrage de la voiture. Il nécessite en effet un fort courant.

26 La prise de terre constitue un dispositif de protection des personnes. Or, tant à l'extérieur que dans les caves, l'humidité diminue la résistance du corps. Les risques d'électrocution sont donc plus importants. Ce sont donc des lieux pour lesquels il faut être mieux protégé. Signalons que la législation impose pour les nouvelles constructions de poser un fusible à courant de défaut (FI) pour les prises qui aboutissent dans les salles de bain, les caves et à l'extérieur.

27 Surtout, ne pas tenter de le dégager en se saisissant de lui. Il faut tenter de couper le courant le plus rapidement possible en utilisant les fusibles.

28 La comparaison des résistances données dans la table I.3 permet de se rendre compte que la résistance de la mine d'un crayon de couleur est importante, alors que celle d'un crayon de papier (du carbone) est faible. Ainsi, il est très dangereux de mettre un crayon de papier dans une prise, car il se peut que cela soit la phase et qu'elle soit active. Malgré sa haute résistance, comme souvent les enfants le mettent à la bouche, un crayon de couleur peut être humide en surface et permettre ainsi le passage d'un courant non négligeable. C'est donc aussi très dangereux.

29 Voir paragraphe 3.3.3. La personne ne doit pas craindre une électrocution, car la partie "tournevis" conductrice est enrobée d'un isolant et reliée (en série) à une très forte résistance.

30 À partir d'un courant de 2 mA. Il reste peu de risques d'électrocution. Mais il n'est pas impossible que le fusible ne déclenche pas lorsqu'il est derrière un transformateur, pour des raisons que nous ne développerons pas ici. Il faut donc garder à l'esprit que malgré son efficacité, il faut rester sur ses gardes.

31 Le risque principal est que la phase vienne toucher le boîtier sans que celui-ci ne décharge vers la terre (l'appareil peut être sur une table isolée du sol, par exemple). L'appareil est branché, son boîtier est à 230 V et on ne se rend compte de rien. Il suffit alors de toucher l'appareil pour être électrocuté.

Ce risque serait partiellement éliminé. En effet, avec le défaut décrit précédemment et une ligne de terre, au moment de brancher l'appareil, le boîtier aurait immédiatement déchargé vers le sol à travers la ligne de terre. Le courant de la phase aurait alors fortement augmenté et le fusible (ou le disjoncteur) aurait sauté. Pour autant que le fusible ait réagi immédiatement. Ce qui n'est pas toujours le cas et dépend des fusibles ...

32 Tant que les personnes restent dans l'autocar, elles sont isolées du sol par les pneus (isolants). Elles ne risquent donc rien. Évidemment, il ne faut pas descendre, car alors la personne créerait un court-circuit (un circuit de faible résistance) vers la terre et l'électrocution pourrait avoir lieu. Il faut donc couper le courant dans la ligne à haute tension.

33 La table I.4 présente les courants pour chaque élément. Le calcul se base simplement sur la loi d'Ohm :

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

| Élément | R (Ω) | I (mA) |
|-----------------|-------------------|--------|
| Fil élec. | ~ 10 | 23'000 |
| Corps | $\sim 100'000$ | 2,3 |
| Semelle plast. | $\sim 10'000'000$ | 0,023 |
| Stylo feutre | $> 10'000'000$ | 0,023 |
| Crayon papier | ~ 30 | 7667 |
| Crayon couleur | $> 1'000'000$ | 0,23 |
| Bois sec (2 cm) | $> 1'000'000$ | 0,23 |
| Tâteur | $> 100'000'000$ | 0,0023 |
| Verre | $> 100'000'000$ | 0,0023 |

TABLE I.4 – Courants divers

34 La table I.5 donne des ordres de grandeur des puissances des principaux appareils domestiques. Ils sont issus de la documentation des appareils.

| Appareils | Puissance (W) |
|------------------------------|--------------------|
| Ampoule normale | 40 |
| Ampoule basse consommation | $7 \equiv 40^a$ |
| Sèche-cheveux | $\sim 1000 - 1600$ |
| Baladeur | ~ 5 |
| Aspirateur | $\sim 1300 - 1700$ |
| Chaîne HiFi (tot) | ~ 200 |
| Ordinateur (tot) | ~ 300 |
| Cuisinière | $\sim 1000 - 3000$ |
| Four micro-onde | ~ 1000 |
| Machine à laver la vaisselle | ~ 1000 |
| Machine à laver le linge | ~ 3000 |
| Sèche-linge | ~ 2500 |

TABLE I.5 – Puissances diverses

Il faut remarquer la forte consommation des sèche-cheveux comparé à une machine à laver la vaisselle

a. A une ampoule normale de 40 W correspond une ampoule basse consommation de 7 W.

(même si elle consomme aussi de l'eau). Il faut remarquer aussi qu'un four à micro-onde est un peu plus économique qu'une cuisinière. Enfin, il faut relever que la puissance d'un radiateur électrique tourne autour de 1000 W pour une chambre de taille normale.

35 On a simplement :

$$P = U \cdot I \Rightarrow I = \frac{P}{U} = \frac{4}{12} = 0,333 \text{ A} = 333 \text{ mA}$$

36 On a simplement :

$$P = U \cdot I = 9 \cdot 0,4 = 3,6 \text{ W}$$

37 On a simplement :

$$P = \frac{U^2}{R} \Rightarrow U = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{0,25 \cdot 800} = 14,14 \text{ V}$$

38 La principale difficulté de ce problème est de bien comprendre dans quelles unités on travaille.

— Résolvons tout d'abord le problème dans les unités du système international. Dans celles-ci, le temps s'exprime en secondes. Ainsi, $t = 7 \text{ h} = 7 \cdot 3'600 = 25'200 \text{ s}$. On peut ensuite calculer facilement l'énergie nécessaire pour laisser allumée la lampe :

$$P = \frac{E}{t} \Rightarrow E = P \cdot t = 200 \cdot 25'200 = 5'040'000 \text{ J}$$

Mais le coût est donné en *cts/kWh*. Il faut donc convertir le résultat de joules en kilowattheures. Comme $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$, on peut écrire :

$$E = 5'040'000 \text{ J} = \frac{5'040'000}{3,6 \cdot 10^6} = 1,4 \text{ kWh}$$

Ainsi, le coût total est donné par :

$$c = 20 \cdot 1,4 = 28 \text{ cts}$$

— Mais, on peut résoudre bien plus facilement ce problème en n'utilisant pas les unités du système international. En effet, on peut convertir la puissance en kW :

$$P = 200 \text{ W} = 0,2 \text{ kW}$$

et utiliser des heures pour le temps :

$$P = \frac{E}{t} \Rightarrow E = P \cdot t = 0,2 \cdot 7 = 1,4 \text{ kWh}$$

Puis, comme précédemment, le coût total est donné par :

$$c = 20 \cdot 1,4 = 28 \text{ cts}$$

Il apparaît clairement ici que l'utilisation d'unités autres que celles du système international est judicieuse puisqu'elle simplifie nettement les calculs.

39 La principale difficulté de ce problème est de bien comprendre dans quelles unités on travaille.

— Résolvons tout d'abord le problème dans les unités du système international. Dans celles-ci la charge s'exprime en coulomb. Or, la charge nous est donnée ici par $\Delta q = 45 \text{ Ah}$. Il s'agit bien d'une charge, puisque :

$$I = \frac{\Delta q}{t} \Rightarrow \Delta q = I \cdot t \Rightarrow$$

$$[\Delta q] = [I] \cdot [t] = \begin{cases} \text{As} & SI \\ \text{Ah} & \text{pas } SI \end{cases}$$

Il s'agit donc de trouver la relation entre les Ah et les C. Pour cela, déterminons la charge Δq en C déplacée par un courant I de 1 A pendant un temps t d'une heure. On a :

$$\Delta q = I \cdot t = 1 \cdot 3'600 = 3600 \text{ C}$$

Car $1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$. Cette même charge peut être calculée en Ah de la manière suivante :

$$\Delta q = I \cdot t = 1 \cdot 1 = 1 \text{ Ah}$$

Ainsi, on a l'équivalence :

$$1 \text{ Ah} = 3600 \text{ C}$$

La charge considérée dans notre problème est donc :

$$\Delta q = 45 \text{ Ah} = 45 \cdot 3600 = 162'000 \text{ C}$$

Cela permet de calculer l'énergie emmagasinée dans la batterie :

$$E = \Delta q \cdot U = 162'000 \cdot 12 = 1'944'000 \text{ J}$$

- Mais, il y a beaucoup plus simple. On peut calculer l'énergie de la batterie en utilisant directement une charge en Ah. Ainsi, on a :

$$E = \Delta q \cdot U = 45 \cdot 12 = 540 \text{ Ah} \cdot \text{V} \\ = 540 \text{ AVh} = 540 \text{ Wh}$$

car :

$$P = U \cdot I \Rightarrow [P] = \text{W} = [U] \cdot [I] = \text{V} \cdot \text{A} = \text{A} \cdot \text{V}$$

Plus simplement, on peut alors exprimer l'énergie de la batterie par :

$$E = 540 \text{ Wh} = 0,54 \text{ kWh}$$

Évidemment, suivant les cas, le résultat n'est pas exprimé dans les mêmes unités. Mais, c'est bien le même. En effet, comme $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$, on a :

$$E = 0,54 \text{ kWh} = 0,54 \cdot 3,6 \cdot 10^6 = 1'944'000 \text{ J}$$

La solution n'utilisant pas les unités du système international est bien plus rapide. Si on peut se permettre d'exprimer le résultat dans une unité qui n'est pas celle du système international, elle est préférable. Notons que les kWh sont une unité d'énergie assez répandue pour que, dans la plupart des cas, on puisse se permettre de l'utiliser.

40 On peut résoudre ce problème de deux manières :

- On trouve le temps grâce à la définition du courant :

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

Pour cela, il faut trouver le courant I nécessaire à faire briller une ampoule de 60 W sous une tension de 12 V :

$$P = U \cdot I \Rightarrow I = \frac{P}{U} = \frac{60}{12} = 5 \text{ A}$$

On a alors :

$$t = \frac{45}{5} = 9 \text{ h}$$

Remarquez que les unités du système international n'ont pas été utilisées.

- On peut calculer l'énergie contenue dans la batterie par :

$$E = q \cdot U = 45 \cdot 12 = 540 \text{ AhV} = 540 \text{ Wh}$$

Puis, par définition de la puissance, trouver le temps :

$$P = \frac{E}{t} \Rightarrow t = \frac{E}{P} = \frac{540}{60} = 9 \text{ h}$$

Dans ce cas aussi, les unités du système international n'ont pas été utilisées pour des raisons de simplicité.

41 Il faut trouver le nombre de kWh nécessaires pour cette action. On a :

$$E = P \cdot t = 25 \cdot 365 \cdot 14 \\ = 127'750 \text{ Wh} = 127,75 \text{ kWh}$$

Le coût est donc :

$$c = 127,75 \cdot 0,20 = 25,55 \text{ frs}$$

42 On peut résoudre le problème de deux manières :

- La puissance totale est de :

$$P = 2 \cdot 40 + 2 + 2 \cdot 6 = 94 \text{ W}$$

Le courant nécessaire pour obtenir une telle puissance sous une tension de 12 V est de :

$$P = U \cdot I \Rightarrow I = \frac{P}{U} = \frac{94}{12} = 7,833 \text{ A}$$

Ainsi le temps de fonctionnement est donné par la définition du courant :

$$I = \frac{\Delta q}{t} \Rightarrow t = \frac{\Delta q}{I} = \frac{40}{7,833} = 5,1 \text{ h}$$

- L'énergie contenue dans la batterie est :

$$E = \Delta q \cdot U = 40 \cdot 12 = 480 \text{ AhV} = 480 \text{ Wh}$$

Comme vu précédemment, la puissance totale est de :

$$P = 2 \cdot 40 + 2 + 2 \cdot 6 = 94 \text{ W}$$

Et le temps de fonctionnement est donc :

$$P = \frac{E}{t} \Rightarrow t = \frac{E}{P} = \frac{480}{94} = 5,1 \text{ h}$$

43 Pour trouver le diamètre du fil par la loi de Pouillet, il faut déterminer sa résistance :

$$P = \frac{U^2}{R} \Rightarrow R = \frac{U^2}{P} = \frac{230^2}{2000} = 26,45 \Omega$$

La loi de Pouillet et la valeur de la résistivité du fer $\rho = 9,7 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$, trouvée dans la table, donnent alors :

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

$$S = \rho \cdot \frac{L}{R} = 9,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1500}{26,45} = 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Or, la surface est donnée par :

$$S = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \Rightarrow$$

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{5,5 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 2,65 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Ainsi, le diamètre du fil est de :

$$d = 2,65 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 2,65 \text{ mm}$$

44 L'énergie totale nécessaire chaque jour est de :

$$E_{\text{jour}} = 3,3 \cdot 3 + 5 \cdot 0,1 \cdot 4 + 3 \cdot 1,1 + 1,8 = 17 \text{ kWh}$$

Pendant un mois, l'énergie dépensée est de :

$$E_{\text{mois}} = 30 \cdot 17 = 510 \text{ kWh}$$

Le coût est donc de :

$$c = 510 \cdot 0,2 = 102.-$$

Pour une utilisation pendant une année, l'énergie nécessaire est de :

$$E_{\text{année}} = 365 \cdot 17 = 6205 \text{ kWh}$$

Par ailleurs, chaque kilogramme de charbon produit une énergie de :

$$\begin{aligned} E &= 7000 \text{ kcal} = 7000 \cdot 10^3 \text{ cal} = 7 \cdot 10^6 \cdot 4,186 \\ &= 29'302 \text{ kJ} = \frac{29,302 \cdot 10^6}{3,6 \cdot 10^6} = 8,14 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Comme seulement 35% de cette énergie est exploitable, chaque kilogramme fournit en réalité :

$$E_{\text{réel}} = 0,35 \cdot 8,14 = 2,85 \text{ kWh}$$

Ainsi, le nombre de kilogrammes nécessaire à produire une énergie totale de 6205 kWh par année, est de :

$$n = \frac{6205}{2,85} = 2178,1 \text{ kg}$$

Soit plus de deux tonnes de charbon!

45 La puissance utilisée par le moteur est :

$$P_{\text{utilisée}} = U \cdot I = 230 \cdot 4,5 = 1035 \text{ W}$$

C'est la puissance électrique qui rentre dans le moteur.

La puissance mécanique que le moteur fournit est de :

$$P_{\text{utile}} = 0,4 CV = 0,4 \cdot 736 = 294,4 \text{ W}$$

C'est la puissance mécanique qui ressort du moteur.

Le rendement se calcule alors par :

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{utilisée}}} = \frac{294,4}{1035} = 0,284 = 28,4\%$$

46 La ville reçoit 600 kW directement exploitables. Pour les deux tensions données, on peut déterminer le courant nécessaire pour fournir cette puissance par :

$$P = U \cdot I \Rightarrow$$

$$I = \frac{P}{U} = \begin{cases} \frac{600 \cdot 10^3}{50'000} \\ \frac{600 \cdot 10^3}{15'000} \end{cases} = \begin{cases} 12 \text{ A} \\ 40 \text{ A} \end{cases}$$

On voit clairement que le courant nécessaire est plus important lorsque la puissance est fournie sous une basse tension.

Les pertes thermiques dans la ligne de 4Ω sont alors données par :

$$P = R \cdot I^2 = \begin{cases} 4 \cdot 12^2 \\ 4 \cdot 40^2 \end{cases} = \begin{cases} 576 \text{ W} \\ 6400 \text{ W} \end{cases}$$

On voit que les pertes sont plus importantes sous une basse tension. Cela est dû au fait que le courant

est plus important et que les fils chauffent plus. La différence est ici de $6400 - 576 = 5824$ W.

Cela explique pourquoi l'énergie électrique est transportée sur des lignes à haute tension : les pertes sont plus faibles. Avec des supraconducteurs (conducteurs de résistance nulle) cela ne serait pas nécessaire.

47 Pour trouver le rayon du fil par la loi de Pouillet, il faut déterminer sa résistance. On écrit ici :

$$P = R \cdot I^2 \Rightarrow R = \frac{P}{I^2} = \frac{1}{10^2} = 0,01 \Omega$$

On applique ensuite la loi de Pouillet :

$$\begin{aligned} R &= \rho \cdot \frac{L}{S} \Rightarrow \\ S &= \rho \cdot \frac{L}{R} = 1,68 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{0,01} \\ &= 1,68 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Et le rayon est alors :

$$\begin{aligned} S &= \pi \cdot r^2 \Rightarrow \\ r &= \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{1,68 \cdot 10^{-6}}{\pi}} \\ &= 7,31 \cdot 10^{-4} \text{ m} \simeq 1 \text{ mm} \end{aligned}$$

48 Le vecteur \vec{L} est orienté nord-sud, vers le sud. Le champ magnétique terrestre \vec{B}_{Terre} est lui orienté nord-sud, mais vers le nord. Ces deux vecteurs sont parallèles, mais de sens opposés. L'angle entre eux est donc de 180° . Ainsi, on a :

$$F = I \cdot L \cdot B \cdot \sin(180) = 0 \text{ N}$$

La force de Laplace est donc nulle.

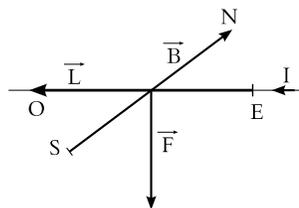
Par contre, si le vecteur \vec{L} est orienté est-ouest, vers l'ouest, l'angle qu'il fait avec le vecteur \vec{B}_{Terre} , orienté lui nord-sud vers le nord, est de 90° . Ainsi, on a :

$$\begin{aligned} F &= I \cdot L \cdot B \cdot \sin(90) \\ &= 10 \cdot 20 \cdot 21,594 \cdot 10^{-6} = 0,00432 \text{ N} \end{aligned}$$

La figure I.9 présente la situation. La règle du tire-bouchon détermine le sens du vecteur \vec{F} , à partir de l'équation de Laplace :

$$\vec{F} = I \cdot \vec{L} \times \vec{B}$$

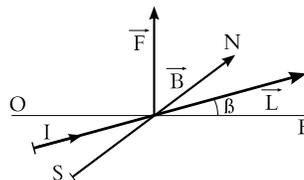
FIGURE I.9 – Fil droit orienté est-ouest



La force agit donc vers le bas, comme le montre la figure I.9.

49 La figure I.10 présente la situation. La règle du tire-bouchon donne clairement une force verticale vers le haut. Comme l'angle $\beta = 30^\circ$, on peut écrire :

FIGURE I.10 – Fils sur des pylônes



$$\begin{aligned} F &= I \cdot L \cdot B \cdot \sin(90 - \beta) \\ &= 20 \cdot 200 \cdot 21,594 \cdot 10^{-6} \cdot \sin(90 - 30) \\ &= 0,0748 \text{ N} \end{aligned}$$

Soit pour cinq fils, la force totale entre les deux pylônes est de :

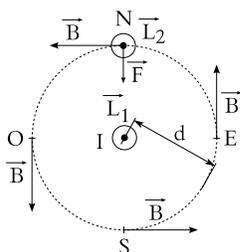
$$F_{tot} = 5 \cdot 0,0748 = 0,374 \text{ N}$$

50 La figure I.11 présente la situation. Le symbole \odot signifie que le courant dans le fil sort de la feuille, c'est-à-dire va vers le haut. C'est le cas pour les deux fils.

La règle du tire-bouchon, pouce dans le sens du courant du fil, les doigts se refermant dans le sens de rotation du champ magnétique autour du fil, permet de représenter les vecteurs champ magnétique à une distance d du fil (ceux-ci sont tangents à la ligne de champ circulaire autour du fil).

La même règle du tire-bouchon, mais cette fois-ci appliquée à la loi de Laplace : doigts sur le vecteur \vec{L}_2 du second fil, se refermant sur le vecteur \vec{B} , permet de placer le pouce pour déterminer le sens de la force \vec{F} .

FIGURE I.11 – Deux fils verticaux



51 Le poids est une force qui s'exerce vers le bas. La force de Laplace agit donc vers le haut. L'angle entre le fil et le champ étant de 90° , sa valeur est donnée par :

$$F = I \cdot L \cdot B = 10 \cdot 2 \cdot 0,1 = 2 \text{ N}$$

Le poids qu'il faut suspendre est donc de 2 N. La masse correspondante est donc d'environ $2/10 = 0,2 \text{ kg} = 200 \text{ g}$ ($g \simeq 10 \text{ m/s}^2$).

52 Le plan dans lequel se trouvent le fil et le champ est le plan xz. Comme la force résultant du produit vectoriel de ces deux vecteurs est perpendiculaire à ce plan, la force de Laplace agit dans la direction de l'axe y. La règle du tire-bouchon (main droite) en donne le sens : sens des y négatifs. La valeur est donnée par :

$$\begin{aligned} F &= I \cdot L \cdot B \cdot \sin(\alpha) \\ &= 0,1 \cdot 0,1 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot \sin(30) \\ &= 5 \cdot 10^{-7} \text{ N} \end{aligned}$$

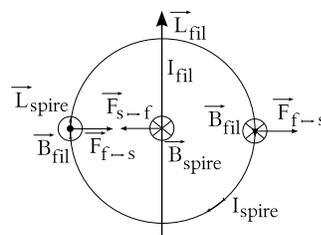
53 La figure I.12 présente la situation. Les symboles \odot et \otimes représentent respectivement un vecteur qui sort de la page et un vecteur qui rentre dans la page.

Les forces exercées par le fil sur la spire aux points les plus éloignés du fil sont notées $F_{f \rightarrow s}$. Elles vont vers la droite. Par contre, la force exercée par la

spire sur le fil, notée $F_{s \rightarrow f}$, va vers la gauche, conformément à la troisième loi de Newton, *action = -réaction*.

Relevons que le champ magnétique créé par la spire en son centre est perpendiculaire à la spire et de sens donné par la règle du tire-bouchon avec les doigts qui suivent le courant dans la spire et le pouce qui donne le champ magnétique.

FIGURE I.12 – Un fil et une spire

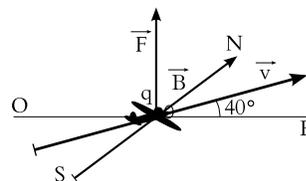


54 La figure I.13 présente la situation. Ici la loi de Lorentz est appliquée :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Comme la charge q est positive, la règle du tire-bouchon s'applique simplement en plaçant les doigts de la main droite sur le vecteur \vec{v} et en allant avec ceux-ci sur le vecteur \vec{B} . Le pouce montre alors le sens de la force \vec{F} . On détermine la valeur de la force

FIGURE I.13 – Un avion chargé (3 dim)



par :

$$\begin{aligned} F &= q \cdot v \cdot B \cdot \sin(90 - 40) \\ &= 10 \cdot \left(343 + \frac{50}{3,6}\right) \cdot 21,594 \cdot 10^{-6} \cdot \sin(50) \\ &= 0,059 \text{ N} \end{aligned}$$

55 Comme les vecteurs vitesse et champ magnétique font un angle de 90° entre eux, la force est simplement donnée par :

$$\begin{aligned} F &= q \cdot v \cdot B \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,01 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 5 \cdot 10^{-9} \\ &= 2,4 \cdot 10^{-21} \text{ N} \end{aligned}$$

56 La vitesse du proton est :

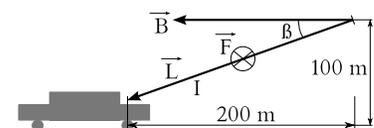
$$v = 108 \cdot 10^6 \text{ km/h} = 3 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

De l'expression de la force de Lorentz, on tire :

$$\begin{aligned} F &= q \cdot v \cdot B \cdot \sin(\alpha) \Rightarrow \\ \sin(\alpha) &= \frac{F}{q \cdot v \cdot B} \\ &= \frac{0,6 \cdot 10^{-12}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^7 \cdot 0,9} \\ &= 0,139 \Rightarrow \\ \alpha &= \sin^{-1}(0,139) = 8^\circ \end{aligned}$$

57 La figure I.14 présente la situation. Manifestement, la force de Laplace implique que la force \vec{F} sur l'éclair rentre dans la feuille (règle du tire-bouchon). Pour déterminer sa valeur, il faut trouver l'angle β

FIGURE I.14 – Éclair sur une voiture



entre \vec{L} et \vec{B} . On a que :

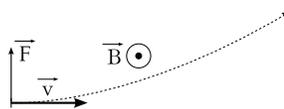
$$\tan(\beta) = \frac{100}{200} \Rightarrow \beta = 26,57^\circ$$

La force se calcule alors par :

$$\begin{aligned} F &= I \cdot L \cdot B \cdot \sin(\beta) \\ &= 10'000 \cdot \sqrt{200^2 + 100^2} \cdot 21,594 \\ &\quad \cdot 10^{-6} \cdot \sin(26,57) \\ &= 21,6 \text{ N} \end{aligned}$$

58 La figure I.15 présente la situation. Le vecteur vitesse \vec{v} pointant vers la droite et en supposant le vecteur \vec{B} sortant de la feuille, le produit vectoriel $\vec{v} \times \vec{B}$ pointe vers le bas. Mais, attention, pour avoir la force de Lorentz, il faut encore multiplier par la charge de l'électron, qui est négative. Cela inverse le sens de la force qui pointe alors vers le haut, conformément à ce qu'on désire pour dévier l'électron comme convenu. Donc le champ \vec{B} sort de la feuille.

FIGURE I.15 – Déviation magnétique



Par ailleurs, on a :

$$\begin{aligned} F &= q \cdot v \cdot B \cdot \sin(90) \Rightarrow \\ B &= \frac{F}{q \cdot v} = \frac{10^{-15}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^3} \\ &= 6,25 \text{ T} \end{aligned}$$

59 L'énergie électrique fournie par le champ électrique à l'électron de charge $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ sous la tension $U = 1000 \text{ V}$ vaut :

$$E = q \cdot U = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1000 = 1,6 \cdot 10^{-16} \text{ J}$$

Cette énergie est transformée en énergie cinétique et on a :

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \Rightarrow \\ v &= \sqrt{\frac{2 \cdot E}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-16}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \\ &= 18'752 \text{ km/s} = 6,25\% c \end{aligned}$$

Soit 6,25% de la vitesse de la lumière.

60 Comme le champ est perpendiculaire à la vitesse, le sinus vaut un et on a simplement :

$$\begin{aligned} F &= q \cdot v \cdot B \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 18'752 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-15} \text{ N} \end{aligned}$$

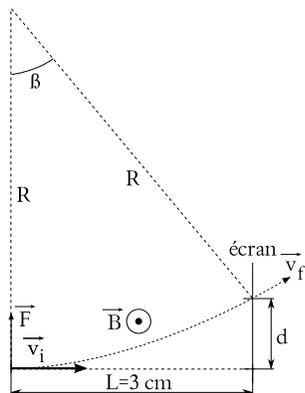
Comme on le voit sur la figure I.16, le mouvement de l'électron est un mouvement circulaire uniforme (MCU). En effet, la force étant perpendiculaire à la vitesse, elle ne fait que dévier l'électron. Pour un tel mouvement, l'accélération prend la forme suivante :

$$a = \frac{v^2}{R}$$

La deuxième loi de Newton donne alors :

$$\begin{aligned} F &= q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{R} \Rightarrow \\ R &= \frac{m \cdot v}{q \cdot B} \\ &= \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 18'752 \cdot 10^3}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-3}} \\ &= 0,1067 \text{ m} \end{aligned} \quad (\text{I.1})$$

FIGURE I.16 – Déviation magnétique sur un écran



Par ailleurs, à partir de la figure I.16, on peut écrire :

$$\begin{aligned} L &= R \cdot \sin(\beta) \Rightarrow \\ \beta &= \arcsin\left(\frac{L}{R}\right) = \arcsin\left(\frac{0,03}{0,1067}\right) = 16,33^\circ \end{aligned}$$

Et finalement, toujours d'après la figure I.16, on a :

$$\begin{aligned} d &= R - R \cdot \cos(\beta) \\ &= 0,1067 - 0,1067 \cdot \cos(16,33) \\ &= 0,0043 \text{ m} = 4,3 \text{ mm} \end{aligned}$$

61 C'est la force de Lorentz :

$$\vec{F}_{magn} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Pour annuler la force magnétique, il faut que :

$$\vec{F}_{electr} = -\vec{F}_{magn}$$

Ainsi, le champ électrique nécessaire est :

$$\begin{aligned} q \cdot \vec{E} &= -q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \\ \vec{E} &= -\vec{v} \times \vec{B} \end{aligned}$$

La trajectoire de l'électron est alors une droite, car la somme des forces qui s'exercent sur lui est nulle.

Numériquement, on a alors :

$$E = v \cdot B \Rightarrow v = \frac{E}{B}$$

Sous cette condition, les particules ne sont pas déviées. Pour réaliser un sélecteur de vitesse, il suffit donc de placer un écran muni d'un trou dans la direction de la vitesse initiale des particules et de les faire traverser deux champs dont le rapport des grandeurs correspond à la vitesse choisie.

62 L'équation I.1 de l'exercice 60 nous permet de calculer la charge des particules inconnues :

$$\begin{aligned} R &= \frac{m \cdot v}{q \cdot B} \Rightarrow \\ q &= \frac{m \cdot v}{R \cdot B} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 500'000'000/3,6}{0,01 \cdot 10 \cdot 10^{-3}} \\ &= 1,26 \cdot 10^{-18} \text{ C} \end{aligned}$$

Or, la charge de l'électron $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Il ne s'agit donc pas d'électrons.

Notes

¹Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:BenjaminFranklin.jpeg>

²Image en copyright-free; vient du site <http://gimp-savvy.com>

³Site sur la foudre : http://pws.prserv.net/Electron.libre/Electron.libre/dossiers/la_foudre.htm

Films sur la foudre : "La magie du climat La foudre-Splendeurs du ciel" Discovery channel, ALPHA MEDIA ; "L'encyclopédie des phénomènes naturels Foudre et éclairs" Puissance Terre, TIME LIFE VIDEO.

⁴Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Bcoulomb.png> notamment pour le copyright de l'image.

Voir aussi le texte original à l'adresse : <http://cnum.cnam.fr/CGI/fpage.cgi?8CA121-1/117/100/416/79/316>

⁵Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Coulomb.jpg>

⁶Voir la page 578 de l'original numérisé à l'adresse : <http://books.google.ch/books?id=ITcVAAAQAAJ&printsec=frontcover&hl=fr#v=onepage&q&f=false>

⁷Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Michael_Faraday_-_Project_Gutenberg_eText_13103.jpg

⁸Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Andre-Marie_Ampere.jpg

⁹Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Georg-simon-ohm2.jpg>

¹⁰Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Claude_Servais_Mathias_Pouillet.jpg

¹¹Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Magnetosphere_rendition.jpg notamment pour le copyright de l'image. Remerciements à la NASA.

¹²Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/50/Nikola_Tesla.jpg

¹³Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Pierre-Simon_Laplace.jpg

¹⁴Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Hendrik_Antoon_Lorentz.jpg

¹⁵Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Onde_electromagnetique.svg notamment pour le copyright de l'image.

¹⁶Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Heinrich_Rudolf_Hertz_2.jpg

¹⁷Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Virginia_class_submarine.jpg

¹⁸Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:AlincoDX77EAnsicht.jpg>

¹⁹Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Radar_antenna.jpg

²⁰Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://en.wikipedia.org/wiki/Image:GPS_Satellite_NASA_art-iif.jpg

²¹Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:KSC_radio_telescope.jpg

²²Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:169141main_piaa09178.jpg

²³Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Lena_River_Delta_-_Landsat_2000.jpg

²⁴Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Laser_effects02.jpg

²⁵Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Bees_Collecting_Pollen_cropped.jpg

²⁶Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:M82_Chandra_HST_Spitzer.jpg

²⁷Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Egret_all_sky_gamma_ray_map_from_CGRO_spacecraft.gif

²⁸Voir le site de l'encyclopédie Wikipedia : http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Luigi_Galvani_Experiment.jpeg

²⁹Voir le site de l'encyclopédie wikipedia : http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Ligne_haute-tension.jpg

³⁰Voir le site de l'encyclopédie wikipedia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:PIC_0044.JPG

Bibliographie

- (1961). *Histoire générale des sciences*, volume tome III, volume 1.
- (1979). *Les grandes découvertes*. Ed. C. Colomb.
- (1988). *Vademecum clinique du diagnostique au traitement*, 12e ed. édition.
- BALIBAR, F. (1992). *Einstein 1905, De l'éther au quanta*. voir.
- BAUER, E. (1949). *L'électromagnétisme*. Manquant.
- BENSON, H., ANTAKI, P. et BOUCHER, P. (1999). *Physique II Électricité et magnétisme*. Ed. du Renouveau Pédagogique, Saint-Laurent (Quebec).
- BLONDEL, C. (1982). Ampère et la création de l'électrodynamique.
- BOUDENOT, J.-C. (2005). *Comment BRANLY a découvert la radio Un siècle de télécommunications*. EDP sciences Les Ulis Cedex A, France.
- COULOMB, C.-A. D. (1884). Mémoires sur l'électricité et le magnétisme. *Collection de mémoires relatifs à la physique publiés par la Société française de physique*, Tome 1 (Premier et second mémoire 1785). Consultable en ligne à l'adresse : <http://cnum.cnam.fr/CGI/fpage.cgi?8CA121-1/126/100/416/79/316>.
- FARADAY, M. (1869). *Faraday's select researches in electricity*. Everyman's library. Consultable en ligne à l'adresse : http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Experimental_researches_in_electricity_022.jpg La page est donnée par le numéro à la fin de l'adresse : 022 correspond à la page 1, 023 à la page 2 ...
- FEYNMAN, R. (1979). *Le cours de physique de Feynman Électromagnétisme 1*. Leighton, Sands.
- FRANKLIN, B. (2006). *Moi, Benjamin Franklin Citoyen du monde, homme des Lumières*. Dunod, Paris.
- GARY, C. (1994). *La foudre*. Masson.
- INCONNU (1989). L'aluminium pour stocker l'électricité. *La recherche*.
- LAPLACE, P.-S. (1836). Exposition du système du monde. Le texte complet se trouve aux deux adresses suivantes : Sous forme caractères : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k88763c> Sous forme d'images : <http://gallica.bnf.fr/Catalogue/noticesInd/FRBNF30739022.htm>.
- LOQUENEUX, R. (1987). *Histoire de la physique*. Que sais-je ?
- LORENTZ, H. A. (1904). *Ergebnisse und Probleme der Elektronentheorie*. Elektronischen Verein zu Berlin, Heerhugowaard. Texte original en allemand disponible à l'adresse : http://www.historyofscience.nl/search/detail.cfm?startrow=15&view=image&pubid=2467&search=&var_pdf=&var_pages= ou http://www.historyofscience.nl/works_detail.cfm?RecordId=5.
- NATAF, H.-C. et SOMMERIA, J. (2008). *La physique et la terre*. Belin, CNRS édition.
- OHM, G.-S. (1827). *Théorie mathématique des courants électriques*. Gallica Bibliothèque Nationale de France BNF. Consultable en ligne à l'adresse : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k95177w/f62.table>.
- ROSMORDUC, J. (1987). *Histoire de la physique*, volume tome 1 de *Points Sciences*. Seuil.

SEGRÉ, E. (voir). *Les physiciens classiques et leurs découvertes*. voir.

TESLA, N. (1919). *Mes inventions*. Electrical Experimenter. Le Récit Autobiographique de NIKOLA tesla (1856 - 1943) Disponible à l'adresse : http://www.extense.com/cgi-bin/x2cgi_view.cgi?userID=49668308&view=on&query=tesla&url=http%3A%2F%2Fquanthomme.free.fr%2Fenergielibre%2Fchercheurs%2Fteslabio.html\#marker.

THULLIER, P. (1990). De frankenstein à mister crosse : les mythes de l'électrobiologie. *La recherche*.

Index

- accumulateur, 21, 31, 40
- action
 - = réaction, 24
 - à distance, 25, 26, 47
 - et réaction, 16
 - instantanée, 25, 47
 - transversale, 53
- aimant, 15, 47, 48, 50, 51, 53
 - en U, 50
 - permanent, 51
- Aldini, 76
- alternatif, 35, 97
- aluminium, 53, 94
- Ampère, 32, 78–81
- ampère, 31, 36, 38, 69, 70, 78
- ampèremètre, 38
- ampoule, 38
- anion, 31
- anode, 41
- antenne, 74
- anti-neutrino, 23
- arachnides artificiels, 76
- arrêt
 - cardiaque, 35
 - cardiorespiratoire, 35
- asphyxie, 35
- balance de Coulomb, 23
- basse tension, 94
- batterie, 73
 - électrique, 77
 - d'automobile, 31
- Biot, 79
- blindage, 28
- bobine, 55, 57, 58
 - de Helmholtz, 57
- Bohr, 16
- boussole, 47, 48, 50, 53, 78–81
- bouteille de Leyde, 21, 73, 77
- brûlure, 35
- cadmium, 41
- cage
 - de Faraday, 28, 58
 - métallique, 20
- calcul différentiel et intégral, 15
- calorique, 76
- canon à électron, 57
- capacité, 40
 - d'un condensateur, 40
 - nominale, 41
- carré de la distance, 24
- cathode, 41
- cation, 31
- cellule solaire, 31
- céramique, 95
- chaleur, 36, 37, 39, 102
- champ, 15, 16, 22, 24–29, 47, 48, 50–52, 54, 69, 88,
91, 97, 98, 100, 103, 104
 - électrique uniforme, 27
 - magnétique terrestre, 47, 48
 - scalaire, 28
 - vectorel, 28
 - électrique, 29
 - de gravitation, 28
- charge, 15, 17–24, 26–29, 31, 39, 47, 51, 52, 56, 69,
73, 77, 79, 83, 85–87, 99, 100, 103
 - élémentaire, 23

- en mouvement, 17
 - immobile, 17
 - totale, 22, 23
- chargeur, 42
- cheveux, 21
- circuit, 31, 32, 36, 37, 39, 74, 76–81, 83–85, 89, 90
 - électrique, 31, 42, 78
 - équivalent, 89
 - nerveux, 74
 - parallèle, 42
 - série, 42
- colonne de convection, 53
- composante horizontale, 49
- conception
 - corpusculaire, 15
 - ondulatoire, 15
- condensateur, 21
- conducteur, 19, 28, 38
 - parfait, 19
- conductibilité, 35
- conflit
 - électrique, 73
 - des deux électricités, 73
- conservation, 23
 - de l'énergie, 28, 77
- consommateur, 42
- contraction, 35, 74, 76
- conversion, 70
- convulsion, 74
- Coulomb, 17, 23–25, 31, 47, 79, 99
- coulomb, 22, 23, 27, 69
- coulombienne, 78
- couple, 54
- courant, 15, 21, 22, 31, 32, 34–39, 47, 50, 51, 53, 56, 69, 73, 76–81, 83, 84, 86, 88, 89, 91, 93, 101–103
 - électrique, 40
 - alternatif, 38, 94
 - continu, 38, 94
 - de magma, 53
 - de rupture, 36, 37
 - nominal, 41
- court-circuit, 38
- cristaux de glace, 22
- Crosse, 76
- cuivre, 94
- cyclotron, 58, 59, 97, 98
- Darwin, 76
- Davy, 78
- décharge, 21, 42, 73, 74, 76, 78, 95
 - profonde, 42
- dépolarisation, 19
- dérive des continents, 49
- désaimanter, 53
- Descartes, 15
- désintégration radioactive, 23
- diode électroluminescente, 36
- dipôle magnétique, 51
- direction du champ magnétique, 48
- disjoncteur, 37, 38
 - à courant de défaut, 38
- distance entre les charges, 18
- dorsale, 49
- dynamos, 31
- éclair, 21, 75
- EE, 70
- effet
 - de peau, 94
 - de pointe, 95
 - du courant, 35
 - instantané, 25
 - Joule, 93
 - mémoire, 41, 42
- Einstein, 15, 16, 25
- électricité atmosphérique, 74
- électrisation et phase, 22
- électro-aimant, 58
- électrocinétique, 17, 73, 78
- électrocution, 33, 35, 101
- électrode, 41, 57, 75, 78, 83–85
- électrolyte, 41
- électromagnétisme, 17
- électromètre, 81
- électron, 23, 31, 57
- électrophysiologie, 74
- électroscope, 19, 20, 81
- électrostatique, 17, 21, 28, 29, 57, 74, 78–80, 103
- embout enfichable, 37
- énergie, 16, 29, 31, 35, 39, 40, 57, 77, 81, 84, 87, 88, 98, 101, 102

- emmagasinée, 40
 entre-fer, 50
 éolienne, 31
 étincelle, 73, 74, 76
 EXP, 70
 expérience d'Ersted, 49, 78

 faible courant, 55
 Faraday, 25, 28
 ferromagnétique, 53
 Feynman, 26
 FI, 38
 Fizeau, 15
 fluide
 - électrique, 76
 - magnétique, 76
 fluides magnétiques, 79
 force, 15, 16, 18, 19, 23–28, 39, 47, 50, 69, 77, 79, 81, 84, 88, 97, 99, 100, 103, 104
 - à distance, 25
 - de Laplace, 53–55
 - de Lorentz, 58
 - magnétique, 25
 Foucault, 15
 foudre, 21–23, 35, 73, 74
 fréquence, 35, 58, 69, 97
 Frankenstein, 75
 Franklin, 17, 18, 75
 Fresnel, 15
 frottements mécaniques, 39
 fusible, 36–38

 Galilée, 15
 Galvani, 73–76
 galvanisme, 73, 76
 galvanomètre, 55, 81
 générateur, 42
 - électrique, 83
 - alternatif, 58
 grandeur vectorielle, 27, 28
 gravitation universelle, 15, 16, 47, 53

 Hamilton, 16
 haute tension, 20, 94
 Hertz, 63, 74
 Huygens, 15

 inertie, 54, 55
 influence, 19, 20
 interaction, 15
 inversion périodique, 49
 ion, 31
 isolant, 19, 20, 23, 32, 35, 36, 78, 91
 isolateur, 94

 joule, 40, 69

 kilowattheure, 40, 102
 Kirchhoff, 80, 90

 Lagrange, 16
 Laplace, 53, 54, 57, 80, 103
 Leclanché, 78
 LED, 36, 38
 Leibnitz, 15
 lésion pulmonaires, 35
 licence GFDL, 2
 ligne
 - aérienne, 94
 - de champ, 28, 48, 51
 - de phase, 35
 - de terre, 37, 101
 - haute tension, 93
 - neutre, 35
 lithium-ion, 41, 42
 loi
 - d'inertie, 16
 - d'Ohm, 31, 32, 81
 - de Coulomb, 24–26, 53, 79
 - de Joule, 40, 94
 - de l'action et de la réaction, 15
 - de la gravitation universelle, 24
 - de Laplace, 56
 - de Lorentz, 56, 57
 - de Pouillet, 32, 36, 93
 Lorentz, 56

 machine
 - électrique, 77
 - de Van der Graaff, 20
 - de Wimshurst, 21
 - statique, 73
 magnétisme terrestre, 53

- magnétosphère, 48
 massage cardiaque, 35
 Maxwell, 15, 16, 25
 mercure, 41
 Michæl Faraday, 29
 modèle mécanique, 15
 monopôle magnétique, 51
 moteur électrique, 55, 93, 102
 mouvement, 15
 rectiligne uniforme, 16
 moyenne tension, 94
 multimètre, 38
 multiple d'unité, 70
 multiprise, 42, 43

 négatif, 18
 neutre, 17, 19, 35, 38, 42
 neutron, 23
 Newton, 15, 16, 24, 25, 97
 newton, 27, 69
 newtonianisme, 24
 newtonien, 15, 79
 nickel
 cadmium, 41
 hydrure métallique, 41
 non polarisable, 83
 notation
 d'ingénieur, 70
 scientifique, 70
 nuage, 21

 Ersted, 79, 80
 Ohm, 33, 81
 ohm, 32, 70
 onde électromagnétique, 62, 74

 particule
 négative, 17
 positive, 17
 peau de chat, 17
 peigne, 20
 pendule, 17, 19, 23, 24
 de torsion, 23
 pertes de distribution, 93
 phénomène de conduction, 80
 phase, 35–38, 42

 physique quantique, 16
 picant d'un oursin, 20, 21
 pile, 31, 38, 74–78, 80, 81, 83–86
 de Daniell, 83, 85
 de Volta, 83
 voltaïque, 83
 plancher océanique, 49
 plomb, 41
 plus petite charge, 23
 point de Curie, 53
 pointe, 22
 polarisation, 17–19, 23, 80, 84
 pôle
 nord, 47, 48, 50, 51
 sud, 47, 48, 51
 portable
 ordinateur, 42
 téléphone, 42
 porteur de charge, 22
 positif, 18
 potentiel, 28, 29, 31, 35, 37, 39, 77, 80, 87, 88
 électrique, 29
 gravifique, 28
 Pouillet, 34, 81
 précurseur, 22
 première loi, 16
 principe de superposition, 27
 prise
 électrique, 35, 38
 murale, 42
 production
 éolienne, 93
 hydroélectrique, 93
 nucléaire, 93
 produit vectoriel, 53
 proton, 23
 puissance, 37–40, 69, 70, 78, 101, 102
 pylône, 94

 quark, 23

 règle du tire-bouchon, 51, 53
 résistance, 19, 31, 32, 34, 36, 38–40, 69, 77, 78, 81,
 89, 90, 93, 102
 équivalente, 43, 89
 en parallèle, 43, 89

- en série, 89
 - série, 43
- résistivité, 32, 33, 93, 94
 - électrique, 32
- ruban isolant, 20
- rupture des gouttes d'eau, 22
- sécurité électrique, 33
- sélecteur de vitesse, 59, 104
- seconde loi, 16
- section d'un fil, 93
- semi-conducteurs, 33
- sens du
 - champ magnétique, 48
 - courant, 31, 55
- séparation, 22
 - des charges, 21
- Shelley Mary, 75, 76
- SI, 69
- solénoïde, 51, 53
- sous-multiple, 70
- spin, 52, 53
- spire, 51, 53, 55, 103
- supraconducteur, 19, 33, 39
- Système
 - international, 69
- système
 - électrique domestique, 33
 - international, 40
- télévision, 57, 74, 104
- tétanisation, 35
- tâteur, 36
- température, 32, 42
- temps de décharge, 40
- tension, 31, 32, 34, 36, 39, 42, 57, 69, 76–78, 80, 81, 84, 86–89, 93, 101–103
 - alternative, 38
 - continue, 38
 - nominale, 42
- Terre, 49
- terre, 35–38, 101
- Tesla, 48, 52
- tesla, 48, 69
- théorie
 - newtonienne, 25
 - ondulatoire, 15
- tournevis-tâteur, 36
- transformateur, 94
- très haute tension, 94
- troisième loi, 16
- turbine, 31
- unité, 69, 70
 - de charge, 23
 - de la résistance, 32, 70
 - de la résistivité, 32
 - du champ, 27
 - du courant, 31, 70
- vent solaire, 48
- ventilation assistée, 35
- verre, 95
- vitesse
 - d'agitation thermique, 91
 - de la lumière, 15
 - des électrons, 91
 - du courant, 91
 - du signal, 91
 - finie, 25
- Volta, 75–78
- voltmètre, 38
- Young, 15