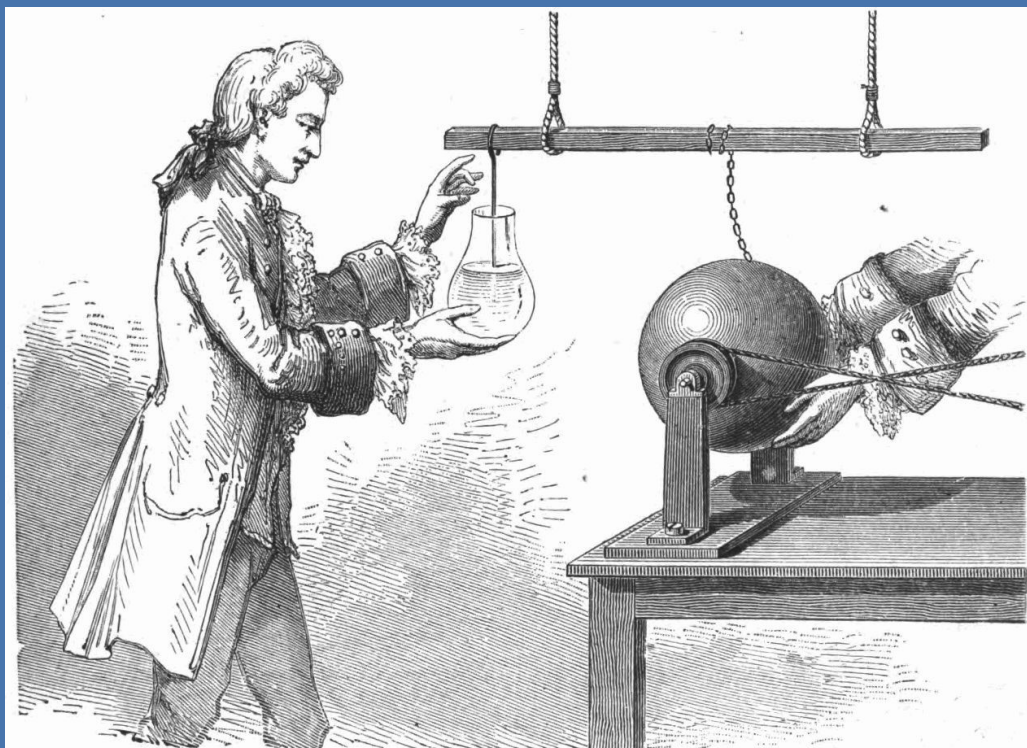


Andre Koch Torres Assis



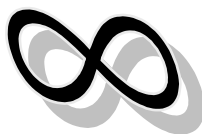
Les fondements
expérimentaux et historiques
de l'électricité

Volume II

Les Fondements Expérimentaux et Historiques de l'Électricité

Volume II

Andre Koch Torres Assis



Apeiron
Montreal

C. Roy Keys Inc.
4405, rue St-Dominique
Montreal, Quebec H2W 2B2 Canada

© André Koch Torres Assis 2026
Traduit par John Plaice

Première publication en 2026

Catalogage avant publication de Bibliothèque et Archives Canada

Titre: Les fondements expérimentaux et historiques de l'électricité / Andre Koch Torres Assis.
Autres titres: Experimental and historical foundations of electricity. Français
Noms: Assis, André Koch Torres, 1962- auteur.
Description: Traduction de : The experimental and historical foundations of electricity. | Comprend des références bibliographiques.
Identifiants: Canadiana (livre imprimé) 2026016996X | Canadiana (livre numérique) 20260170100 | ISBN 9781987980493 (couverture souple ; vol. 2) | ISBN 9781987980509 (PDF ; vol. 2)
Vedettes-matière: RVM: Électricité—Expériences. | RVM: Électricité—Histoire.
Classification: LCC QC533 .A8814 2026 | CDD 537.078—dc23

Illustration de couverture: L'une des premières représentations de l'expérience de la bouteille de Leyde (1745). Source: A. P. Deschanel, *Elementary Treatise on Natural Philosophy*, D. Appleton and Co., New York, 1876. Partie 3, p. 570, Figure 382. Traduit par J. D. Everett.

Illustrations de la quatrième de couverture : Photos de certains instruments décrits dans cet ouvrage. Un versorium en métal. Un versorium de Du Fay en plastique, dont l'extrémité d'une des pattes est enveloppée de feuille d'aluminium.

LES FONDEMENTS EXPÉRIMENTAUX ET HISTORIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ

Volume 2

ANDRE KOCH TORRES ASSIS

Traduit par JOHN PLAICE

© Andre Koch Torres Assis

Table des matières

Préface du traducteur	ix
Présentation et remerciements	xi
1 Introduction	1
1.1 L'effet de l'ambre	1
1.2 La série triboélectrique	3
1.2.1 La position de l'eau dans la série triboélectrique	3
1.3 Faits simples et élémentaires sur l'électricité	5
1.3.1 Nous n'expliquons pas ces faits, ils ont simplement été énumérés	10
1.3.2 Signification de certaines expressions	10
2 Instruments électriques	13
2.1 Liste du matériel nécessaire pour les expériences	13
2.2 L'électroscope : l'instrument le plus important de l'électrostatique	14
2.2.1 Principaux composants d'un électroscope	16
2.2.2 Comparaison entre l'électroscope à feuilles d'or et l'électroscope fabriqué à partir de matériaux peu coûteux	17
2.2.3 L'électroscope et la découverte des rayons cosmiques	18
2.3 Le versorium	19
2.3.1 Le versorium métallique soutenu par une épingle	19
2.3.2 Le versorium métallique soutenu par un morceau de plastique pointu	19
2.3.3 Le versorium en plastique	20
2.3.4 Le versorium de Du Fay	21
2.3.5 Principaux composants de ces versoria	21
2.4 Le pendule électrique	22
2.4.1 Le pendule électrique classique	22
2.4.2 Le pendule fléché	22
2.4.3 Le pendule en plastique	22
2.4.4 Principaux composants de ces pendules	23
2.5 Fil pendulaire de Gray	24
2.6 Collecteurs de charge	24
2.7 Testeur de circuit	26

3	Conducteurs et isolants	29
3.1	Classification des substances en conducteurs ou isolants à l'aide de l'électroscope	29
3.1.1	Définition des termes « conducteur » et « isolant » lorsqu'une haute tension est appliquée entre les extrémités du corps	32
3.1.2	Corps qui se comportent comme des conducteurs ou des isolants dans les expériences habituelles d'électrostatique	33
3.2	Classification des substances en conducteurs ou isolants à l'aide du testeur de circuit	38
3.2.1	Définition des termes « conducteur » et « isolant » lorsqu'une faible différence de potentiel est appliquée entre les extrémités du corps	40
3.2.2	Corps qui se comportent comme des conducteurs ou des isolants dans les expériences habituelles à courant constant	40
3.3	Facteurs influençant les propriétés conductrices et isolantes d'une substance	42
3.3.1	Nature ou composition chimique de la substance	42
3.3.2	Différence potentielle entre les extrémités du corps	43
3.3.3	Le temps nécessaire pour décharger un corps électrisé	43
3.3.4	La longueur du corps	44
3.3.5	La section transversale du corps	48
3.3.6	Humidité	54
3.3.7	Orientation du corps par rapport à la tension appliquée	56
3.3.8	Température	59
3.3.9	Illumination	60
3.3.10	Autres facteurs	60
3.4	Lois relatives aux circuits électriques transportant des courants continus	61
4	Conducteurs et isolants dans quelques expériences simples	63
4.1	Conducteurs et isolants dans l'effet de l'ambre	63
4.1.1	Explication de l'effet de l'ambre dans les manuels scolaires	63
4.1.2	Notre explication de l'effet de l'ambre	65
4.1.3	Il est important de présenter une explication détaillée de l'effet de l'ambre	68
4.2	Conducteurs et isolants dans l'expérience sur l'attraction d'un filet d'eau	69
4.2.1	Explication de l'attraction d'un filet d'eau dans les manuels scolaires	69
4.2.2	Notre explication de l'attraction d'un filet d'eau	70
4.2.3	Il est important de présenter une explication détaillée de l'attrait d'un filet d'eau	72
4.3	Différences entre les verres anciens et modernes	73
4.3.1	Comportement conducteur ou isolant	74
4.3.2	Densité des charges superficielles acquises par frottement	75
4.3.3	Le signe des charges acquises par le verre frotté	77
4.3.4	Le verre dans les manuels scolaires modernes et l'importance de corriger ce qu'ils disent	78

4.4	Le mécanisme <i>ACR</i>	80
4.4.1	Explication du mécanisme <i>ACR</i>	82
4.4.2	Situations dans lesquelles le mécanisme <i>ACR</i> ne s'applique pas	84
4.5	L'importance de la découverte des conducteurs et des isolants par Stephen Gray	86
5	Électrisation de rubans adhésifs	89
5.1	Comportement isolant ou conducteur du ruban	89
5.2	Électrisation du ruban	93
5.3	Neutralisation du ruban	96
5.4	Électrisant des rubans avec des charges opposées	98
5.5	Dipôles électriques	101
5.6	Aspects généraux liés aux rubans adhésifs	105
6	L'électrophore	107
6.1	L'instrument	107
6.2	Fonctionnement de l'électrophore	108
6.3	Un témoignage personnel	113
7	Répartition des charges dans un conducteur	117
7.1	Répartition des charges dans les conducteurs	117
7.1.1	Expériences avec des électroscopes	117
7.1.2	Collecte des charges situées sur les parois internes et externes d'un conducteur électrisé	121
7.1.3	Gray, Franklin et la répartition des charges sur les conducteurs électrisés	124
7.1.4	Conducteurs électrisés touchant les parois internes et externes d'un autre conducteur	127
7.1.5	Répartition des charges dans les conducteurs ouverts et fermés	131
7.2	Charges induites sur les parois internes et externes d'un conducteur creux	132
7.3	Actions exercées par un conducteur creux électrisé sur des corps internes et externes	135
7.4	L'expérience du seau à glace de Faraday	136
8	Blindage électrique	139
8.1	Placer un conducteur ou un isolant entre un corps électrisé et un corps léger	139
8.1.1	Quelques anciennes recherches sur le dépistage	142
8.2	Expériences avec des conducteurs creux	144
8.3	Conditions suffisantes pour un blindage efficace	148
8.4	Cage de Faraday	153

9	L'effet de pointe	155
9.1	Illustrer l'effet de pointe à l'aide d'électroscopes	155
9.2	Collecte et comparaison des densités de charge superficielle	158
9.3	Gray et l'effet de pointe	161
9.4	Intensification de l'effet de l'ambre	165
10	Équilibre électrique et l'instrument indiquant la différence de potentiel	167
10.1	Conducteur en équilibre électrique	167
10.2	Le potentiel électrique d'un conducteur	169
10.3	Électroscope avec boîtier conducteur	170
10.4	Expériences utilisant l'électroscope avec boîtier conducteur	176
10.4.1	L'électroscope montre que toutes les parties d'un conducteur en équilibre ont le même potentiel	176
10.4.2	Procédés permettant de modifier le potentiel d'un conducteur par rapport au potentiel d'un autre conducteur	181
10.5	Kelvin et l'électromètre pour mesurer la différence de potentiel	184
11	Décharges électriques dans l'air	189
11.1	Étincelles	189
11.2	Commentaires sur ces expériences	194
11.3	Paratonnerres	196
11.4	Paratonnerre isolé du sol	197
11.5	Étincelles dans le mécanisme ACR	198
11.6	Lampe au néon	199
11.7	Gray, Franklin, l'effet de pointe et la nature électrique de la foudre	201
11.8	Applications de l'effet de pointe	210
12	La bouteille de Leyde et les condensateurs	211
12.1	Fabrication d'un condensateur	211
12.1.1	N'utilisez pas de bouteille en verre pour isoler le conducteur interne du conducteur externe.	213
12.2	Expériences avec le condensateur	214
12.3	Mécanisme de fonctionnement du condensateur	220
12.4	Gray, Du Fay et l'électrisation de l'eau	221
12.5	Les premiers condensateurs	227
13	Préservation temporelle de l'électrisation des corps	235
13.1	Décharge dans l'air	235
13.2	Préserver l'électrisation des isolants	236
13.2.1	Quelques commentaires sur ces expériences	239
13.3	Préserver l'électrisation des conducteurs	239
13.4	Électrets	240
13.4.1	Définitions	240
13.5	Production d'électrets	243
13.5.1	Matériaux	243

13.5.2	Fabrication d'électrets	244
13.6	Électrophore avec une base en électret	247
13.7	Stephen Gray, les électrets et la préservation temporelle de l'électrisation des corps	247
13.8	Développement et applications des électrets	254
14	Les mystérieuses forces non électrostatiques	257
14.1	Force électrostatique ou force de Coulomb	257
14.2	Forces non électrostatiques dans les configurations d'équilibre stable	259
14.3	Forces non électrostatiques dans l'effet de l'ambre	263
14.3.1	Autres mystères dans l'effet de l'ambre	267
14.4	Forces non électrostatiques agissant à l'intérieur d'une batterie	268
14.5	Forces non électrostatiques dans les circuits transportant des courants continus	269
14.6	Forces non électrostatiques dans d'autres situations	270
14.7	Origines des forces non électrostatiques	271
14.7.1	Théorie de Faraday et Maxwell basée sur les champs électromagnétiques	273
14.7.2	Électrodynamique de Weber basée sur l'interaction entre particules électrisées	274
	Bibliographie	279

Préface du traducteur

Nous reproduisons ici, avec quelques modifications, la présentation incluse dans le premier volume de cet ouvrage.

Cet ouvrage est la traduction française du second volume du livre *The Experimental and Historical Foundations of Electricity*.¹ Il est le résultat d'une rencontre entre l'auteur André Assis et moi-même au Portugal en juin 2025. À Sesimbra, dans la conférence *DemystifySci* organisée par Anastasia Bendebury et Michael Shilo DeLay, André a fait une présentation des idées de Charles-Édouard Guillaume et d'autres, prévoyant dès 1896 un rayonnement dans le cosmos entre 2K et 5K, des décennies avant la découverte d'Arno Penzias et Robert Wilson du rayonnement cosmique fossile.²

Je suis les travaux d'André depuis de nombreuses années, puisqu'il est une des personnes qui a le plus contribué à la compréhension de l'histoire de la recherche scientifique dans le domaine de l'électricité. Il a organisé la traduction en anglais et en portugais des œuvres sur l'électricité de Charles-Augustin de Coulomb, d'André-Marie Ampère et de Wilhelm Eduard Weber.³ Dans les deux volumes de cet ouvrage spécifique, André élabore sur les pas poursuivis par les premiers chercheurs du XVIII^e siècle, avec leurs découvertes de principes de base, qui peuvent être démontrés par des expériences simples faites à la maison.

Quand nous nous sommes rencontrés au Portugal, André m'a proposé, en honneur du 250^e anniversaire de la naissance d'Ampère, de traduire cet ouvrage. J'ai accepté sur le champs. Plus tard, j'ai appris que Bertrand Wolff et Christine Blondel avaient déjà écrit en 2011 qu'« Une édition française [du premier volume] serait bienvenue ! »⁴ J'espère donc que cette traduction du second volume dans la langue de Racine puisse aussi être d'une utilité pour les jeunes scientifiques de la Francophonie.

Je voudrais dédier la traduction de ce volume à mon épouse et mes trois enfants, pour qui le français est la langue commune.

John Plaiçe, Bogotá, mars 2026

<https://johnplaiçe.substack.com>

¹Le premier volume a été publié en anglais, portugais, italien et russe : [Ass10a], [Ass10b], [Ass15b] et [Ass17]. Le second volume a été publié en anglais, portugais et russe : [Ass18a], [Ass18b] et [Ass19].

²Why the CMB Is Evidence Against the Big Bang. <https://youtu.be/bboKmG0uUuU>.

³[Ass22], [AB23]; [AC11], [AC15]; [Ass21a], [Ass21b], [Ass21c], [Ass21d], [Ass24], [Ass25a], [Ass25b], [Ass25c] et [Ass25d].

⁴[WB11, note 3, p. 717]

Présentation et remerciements

Nous reproduisons ici, avec quelques modifications, la présentation incluse dans le premier volume de cet ouvrage.⁵

Au début des années 1990, j'ai découvert les travaux de Norberto Cardoso Ferreira, de l'Institut de physique de l'Université de São Paulo (USP), au Brésil. L'un de ses domaines de recherche consistait à démontrer expérimentalement les aspects les plus importants de l'électricité à l'aide de matériaux très simples et facilement disponibles. J'ai eu l'occasion de lui rendre visite à l'USP en 1993. Au cours de cette visite, il m'a donné un petit ensemble de matériel expérimental composé de carton fin, de pailles en plastique, de papier de soie, d'attaches-papier, etc. Il m'a montré comment réaliser les principales expériences et m'a également présenté son livre *Plus et Moins : Les Charges Électriques*.⁶ J'ai été fasciné par ce que j'ai appris, réalisant qu'il était possible de visualiser expérimentalement des phénomènes physiques très profonds à l'aide de matériaux faciles à trouver. J'ai conservé ce matériel comme un trésor pendant 10 ans, mais je ne l'ai ni utilisé ni développé pendant cette période. Je suis extrêmement reconnaissant à Norberto Ferreira pour ce qu'il m'a enseigné. Récemment, j'ai découvert d'autres travaux de Ferreira, toujours aussi riches et créatifs.⁷ J'ai également beaucoup appris lors de discussions avec ses étudiants, tels que Rui Manoel de Bastos Vieira et Emerson Izidoro dos Santos.

En 2005, j'ai rencontré Alberto Gaspar et découvert son livre *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental*.⁸ J'ai également beaucoup appris de ce livre ainsi que de ses autres ouvrages.⁹

Entre 2004 et 2007, j'ai donné des cours à des professeurs de sciences du secondaire dans le cadre du projet « Teia do Saber » du ministère de l'Éducation de l'État de São Paulo, au Brésil. Ce fut un grand privilège d'être invité à participer à ce projet. Le soutien que j'ai reçu du ministère de l'Éducation et du groupe de coordination des projets éducatifs de l'université de Campinas (GGPE—UNICAMP), ainsi que les riches contacts avec les professeurs de sciences du secondaire qui ont suivi nos cours, ont été extrêmement productifs et stimulants pour moi. J'ai également beaucoup profité des nombreux échanges d'idées avec les professeurs de l'université de Campinas qui ont participé à ce projet. Dans le cadre de mes activités, j'ai décidé d'enseigner aux

⁵[Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

⁶[FM91].

⁷[Fer78], [Fersda], [Fersdb], [Fersdc], [Fersdd], [Fer06], [Fer01c], [Fer01d], [Fer01b] et [Fer01a].

⁸[Gas03].

⁹[Gas91] et [Gas96].

professeurs de sciences du secondaire ce que j'avais appris avec Norberto Ferreira. J'ai donc repris les expériences avec pour objectif supplémentaire d'écrire ce livre, afin de partager tout ce matériel fascinant avec un public plus large.

La plupart des expériences décrites dans ce livre s'inspirent des travaux originaux des scientifiques mentionnés ici, ainsi que des livres et articles de Norberto Ferreira et Alberto Gaspar. Depuis 2004, j'ai découvert d'autres ouvrages imprimés et des sites web intéressants qui m'ont été extrêmement utiles dans mon apprentissage dans ce domaine, comme le site «Feira de Ciências», organisé par Luiz Ferraz Netto.¹⁰

John L. Heilbron a suggéré des améliorations pertinentes dans la première version du volume 1 de cet ouvrage. Son excellent livre, *Electricity in the 17th and 18th Centuries: A Study in Early Modern Physics*,¹¹ a été ma principale source d'informations historiques sur l'électrostatique. De nombreuses suggestions importantes visant à améliorer les versions précédentes des deux volumes de cet ouvrage ont également été formulées par Arthur Baraov, Sérgio Luiz Bragatto Boss, Juliano Camillo, Daniel Gardelli, Robert W. Gray, John B. Eichler, Steve Hutcheon, C. Roy Keys, Breno Arsioli Moura, Anabel Cardoso Raicik, Fabio Miguel de Matos Ravanelli, João Ricardo Neves da Silva et Bertrand Wolff.

Je remercie Arthur Baraov pour les traductions russes des deux volumes de cet ouvrage,¹² ainsi que Pietro Cerreta, Andrea Cerreta, Raffaele Cerreta, Rita Serafini et Riccardo Urigu pour la traduction et la publication du premier volume en italien.¹³ Pietro Cerreta, Derk Frerichs et Stephan Pfeiler ont réalisé plusieurs vidéos basées sur les expériences présentées dans ce livre.¹⁴ Je remercie également Fernando Lang da Silveira et Jenaro Guisasola pour leurs critiques de cet ouvrage.¹⁵

Les illustrations du volume 1 de cet ouvrage ont été réalisées par Daniel Robson Pinto, grâce à une bourse accordée par SAE/UNICAMP, que nous remercions pour son soutien. Daniel a également contribué à l'obtention d'illustrations et de références anciennes.

Je tiens également à remercier plusieurs autres personnes pour leurs suggestions, leurs discussions et leurs références : Dayane de Souza Bancoff, Christine Blondel, Paolo Brenni, Thiago Augusto de Lima Burgo, João José Caluzi, Hugo Bonette de Carvalho, Danylo do Amaral Cavalcanti, João Paulo Martins de Castro Chaib, Asit Choudhuri, Roberto Clemente (à titre posthume), Silvio Dahmen, Charbel El-Hani, Henrique Ennes, Moacir Pereira de Souza Filho, Junichiro Fukai, Cláudio H. Furukawa, Hans Gaab, Fernando Galembeck, Robert Harry van Gent, Harald Goldbeck-Löwe, Jürgen Gottschalk, Jenaro Guisasola, Hermann Härtel, Peter Heering, Elizabeth Ihrig, Antonio Iovane, John Jenkins, Basilio José Augusto José, Kostas Kampourakis, Siegfried Kett, Martin Kostal, Ellen Kuhfeld, Wolfgang Lange, Fabio Menezes de Souza Lima, Lin Liu, José Joaquín Lunazzi, Ceno Pietro Magnaghi, Francisco das Chagas Marques, Thiago Marques, Michael Matthews, Alexandre Medeiros, Eduardo Meirelles, Manoel Guilherme da Silva Mello, Mahmoud Melehy (à titre posthume), Paulo Henrique Dias

¹⁰[Netsd].

¹¹[Hei99].

¹²[Ass15b] et [Ass19].

¹³[Ass17].

¹⁴[Cer14a], [Cer14b], [Cer17] et [FPsd].

¹⁵[Sil10c] et [Gui12].

Menezes, Dennis Nawrath, Marcos Cesar Danhoni Neves, Horst Nowacki, Ronaldo Furtado de Oliveira, Martin Panusch, Sônia Peduzzi, Luiz O. Q. Peduzzi, José Rafael Boesso Perez, Gerald H. Pollack, Eugênio Maria de França Ramos, Karin Reich, Edson Eduardo Reinehr, Ricardo Rodrigues, Waldyr Alves Rodrigues Jr. (à titre posthume), Torsten Rütting, Dirceu Tadeu do Espírito Santo, Emely Giron dos Santos, Wayne M. Saslow, Daniel dos Anjos Silva, Carlos Augusto Silva, Valter Aparecido da Silva Junior, Leandro Herculano da Silva, Fernando Lang da Silveira, Moacir Pereira de Souza Filho, Julian David Medina Tamayo, Milton G. Tarazona, Christian Ucke, Alvaro Vannucci, Geraldo Magela Severino Vasconcelos, Haroldo Fraga Campos Velho, Greg Volk, Karl-Heinrich Wiederkehr (à la mémoire), Bernd Wolfram et Gudrun Wolfschmidt.

Je tiens à remercier les instituts de physique et de mathématiques, le groupe de coordination des projets éducatifs et le Fundo de Apoio ao Ensino, à Pesquisa e à Extensão (FAEPEX) de l'université de Campinas (UNICAMP), qui m'ont apporté le soutien nécessaire à la réalisation de ce travail. Je remercie également l'Institut d'histoire des sciences naturelles de l'université de Hambourg et la Fondation Alexander von Humboldt d'Allemagne pour la bourse de recherche qu'ils m'ont accordée en 2009, ce qui m'a permis de rassembler une documentation bibliographique considérable pour cet ouvrage.

Roy Keys, rédacteur en chef d'Apeiron, m'apporte son soutien depuis de nombreuses années. Sans ses encouragements, certains de mes livres n'auraient peut-être jamais vu le jour. Il a réalisé un excellent travail éditorial pour cet ouvrage.

Andre Koch Torres Assis
Institute of Physics
University of Campinas—UNICAMP
Rua Sergio Buarque de Holanda 777
13083-970 Campinas - SP, Brazil
<https://www.ifi.unicamp.br/~assis>

Chapitre 1

Introduction

1.1 L'effet de l'ambre

Expérience 1.1 — *Électriser un corps par friction*

L'expérience la plus simple et la plus ancienne sur l'électricité, qui a donné naissance à ce domaine de recherche, est appelée « l'effet de l'ambre ».¹ Elle a été initialement réalisée avec de l'ambre (« électron » en grec), qui est une résine fossile dure. Elle sera reproduite ici avec une paille en plastique ou une règle en acrylique. Ce comportement est également appelé « effet triboélectrique » ou « triboélectricité ». Le préfixe « tribo » a également une origine grecque, signifiant friction ou frottement. Cet effet est lié à l'électrisation des corps obtenue par frottement.

Placez quelques morceaux de papier sur une table. Approchez une règle en acrylique ou une paille en plastique des morceaux de papier, en veillant à ne pas les toucher. Rien ne se passe avec les morceaux de papier, figure 1.1.

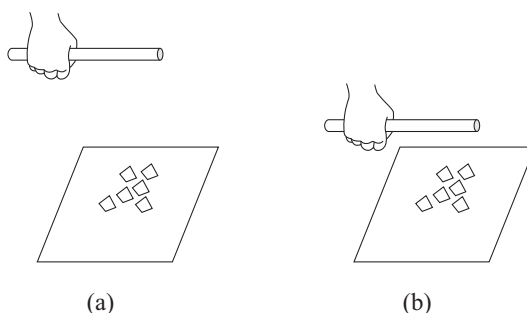


FIG. 1.1 : (a) La paille en plastique est éloignée des morceaux de papier. (b) Lorsque la paille en plastique est approchée de ces morceaux, ceux-ci ne subissent aucun effet.

Frottez maintenant la règle ou la paille dans des cheveux ou avec une feuille de

¹Expérience 2.1 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

papier ou un mouchoir en coton, en la déplaçant rapidement de haut en bas. Nous représentons la partie de la paille qui a été frottée par la lettre F , tirée du mot « friction », figure 1.2.

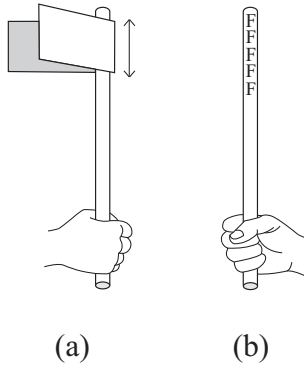


FIG. 1.2 : (a) Paille en plastique frottée avec du papier. (b) La lettre F représente la zone frottée de la paille.

Approchez la paille frottée des petits morceaux de papier, sans les toucher, en restant très près. Observez qu'à une certaine distance, ils sautent sur la paille frottée et y restent attachés, figure 1.3. Lorsque la paille s'éloigne de la table, les morceaux de papier restent attachés à la paille.

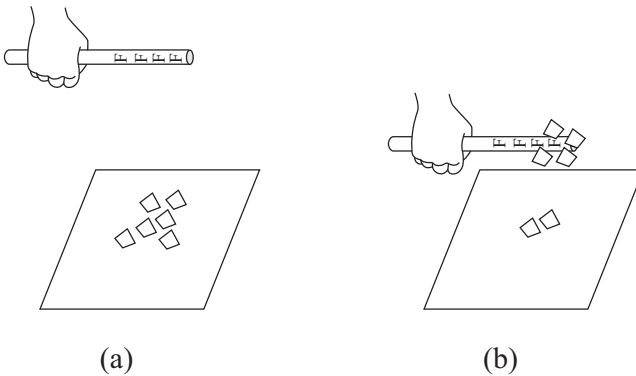


FIG. 1.3 : (a) Une paille frottée loin de petits morceaux de papier. (b) La paille frottée attire les morceaux de papier lorsqu'on l'approche d'eux.

Tous les morceaux de papier ne restent pas attachés à la paille frottée. Certains d'entre eux touchent la paille et tombent. D'autres sont émis ou réfléchis vers la table. Ce sujet est abordé plus en détail dans la section 4.4.

Le comportement différent des morceaux de papier lorsqu'ils sont proches de ces pailles conduit à une définition importante.

Définition 1.1

Nous disons que le plastique qui n'a pas été frotté et qui n'attire pas les petits morceaux de papier est « électriquement neutre », « neutre » ou qu'il a une « charge nulle ». Lorsqu'il a été frotté et qu'il a acquis la capacité d'attirer des morceaux de papier, nous disons qu'il « a acquis une charge électrique », qu'il est « devenu électrisé », « chargé électriquement » ou, simplement, « chargé ». Le processus de frottement est appelé « effet triboélectrique », « triboélectrisation », « électrisation par frottement », « charge obtenue par frottement », « charge par frottement », « électrisation par frottement » ou « électrisation par friction ». Cette attraction est parfois appelée « attraction électrique » ou « attraction électrostatique ».

1.2 La série triboélectrique

Comme indiqué dans le volume 1 de cet ouvrage,² il existe deux types de corps électrisés, généralement appelés corps positifs et négatifs. Lorsque deux corps neutres différents sont frottés l'un contre l'autre, l'un d'eux devient chargé positivement et l'autre négativement. Si l'un de ces corps est un conducteur, il ne restera chargé que s'il est isolé du sol. Après avoir réalisé de nombreuses expériences, nous sommes arrivés au tableau 1.1.

Ce tableau doit être lu comme suit : lorsque le corps *I* est frotté contre le corps *II*, celui qui est chargé positivement sera celui qui se trouve au-dessus de l'autre. Autrement dit, le corps qui est le plus proche du symbole « + » deviendra chargé positivement, tandis que l'autre corps deviendra chargé négativement. Par exemple, lorsque la paille en plastique est frottée contre la soie, la soie deviendra positive et le plastique négatif.

Définition 1.2

Une liste telle que celle du tableau 1.1 est appelée une « série triboélectrique ». Le préfixe « tribo » vient du grec. Il signifie friction ou frottement. Une série triboélectrique indique les types d'électrisation obtenus par friction.

Une paille en plastique et une règle en acrylique se chargent négativement lorsqu'elles sont frottées avec des cheveux ou une feuille de papier. Par conséquent, à partir de maintenant, une paille en plastique et une règle en acrylique seront représentées comme ayant des charges négatives (ou se chargeant négativement) lorsqu'elles sont frottées contre ces matériaux.

1.2.1 La position de l'eau dans la série triboélectrique

Les liquides se chargent également lorsqu'ils s'écoulent dans des canaux solides.³ On savait depuis 1675 que des éclairs de lumière apparaissaient dans l'espace évacué au sommet d'un baromètre à mercure lorsqu'on le secouait dans l'obscurité. On

² Chapitre 5 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

³ [Gre94].

Tab. 1.1 : Série triboélectrique.

+
cheveux
verre lisse
peau humaine
polyamide synthétique
coton
soie
papier ou carton fin
cuir
porcelaine
feuille d'aluminium
bois
liège
tissu acrylique
polystyrène
sac en plastique
paille en plastique
acrylique rigide
tube en caoutchouc
-

a découvert plus tard que ces lumières provenaient de la charge statique développée dans le mercure lorsqu'il se déplaçait contre les parois en verre du baromètre. En 1840, le conducteur d'une locomotive à vapeur a reçu un choc électrique lorsqu'il a approché sa main du jet de vapeur à haute pression s'échappant de la chaudière, alors qu'il touchait la chaudière de l'autre main. William Armstrong (1810–1900) a étudié ce phénomène. Il a isolé électriquement la chaudière du sol et a dirigé le jet vers un conducteur métallique isolé. Le conducteur s'est chargé positivement tandis que la chaudière s'est chargée négativement. En 1843, il a construit un générateur hydroélectrique basé sur ce principe. Michael Faraday (1791–1867) a également étudié ce phénomène vers 1843. Il a démontré que l'électrisation était due au frottement entre la vapeur et les gouttes d'eau expulsées par la chaudière qui frottaient contre les parois de la buse. Un jet d'air sec ne produisait aucun effet, mais de l'électricité se dégageait lorsque de l'air humide était utilisé. Le signe de la charge produite dans l'eau pouvait être modifié en choisissant un matériau approprié pour la buse. Il a également conclu que l'excitation de l'électricité était clairement indépendante de l'évaporation ou du changement d'état de l'eau (de liquide à vapeur). De plus, afin de collecter une bonne quantité d'électricité, il fallait utiliser de l'eau pure ou distillée. L'eau courante fournie à Londres était incapable de produire de l'électricité, tout comme l'ajout de substances conductrices à l'eau pure. Il expliqua ce fait en disant que lorsque l'eau devenait un si bon conducteur, l'électricité produite par son frottement contre le métal ou un autre

corps pouvait être immédiatement déchargée à nouveau. Plus l'eau était isolante, plus l'électricité collectée par frottement était élevée. En comparant la position de l'eau dans la série triboélectrique avec plusieurs autres substances, il conclut que l'eau se situait près du sommet de la liste. Lorsqu'elle coulait contre des surfaces solides, elle s'électrisait normalement de manière positive, tandis que le matériau solide devenait négatif. Il présenta l'une de ses conclusions comme suit :^{4,5}

2107. Après avoir ainsi présenté le résultat du frottement de la vapeur et de l'eau contre tant de corps, je peux ici souligner la circonstance remarquable selon laquelle l'eau est *positive* pour tous. Elle trouvera très probablement sa place au-dessus de toutes les autres substances, même les poils de chat et l'oxalate de chaux (2131).

Des recherches modernes confirment ces résultats. Récemment, Burgo, Galembeck et Pollack ont utilisé de l'eau s'écoulant dans des tubes de différents matériaux et ont conclu que la charge de l'eau est toujours positive, sauf lorsqu'elle tombe dans l'air.⁶

Robert Andrews Millikan (1868–1953) a utilisé l'électrisation par écoulement dans ses célèbres expériences sur les gouttes d'huile pour déterminer la charge de l'électron. Les gouttes se sont électrisées lorsqu'elles ont été pulvérisées dans la chambre expérimentale. Dans son livre de 1917, *The Electron*, il mentionne ce qui suit :^{7,8}

Les gouttes [...] se sont généralement avérées fortement chargées par le processus de friction lors du soufflage du jet [d'huile] [à travers un petit orifice] [...]

Dans de nombreuses séries triboélectriques trouvées dans la littérature et sur Internet, l'air apparaît en tête du côté positif de la liste, même avant l'eau et d'autres matériaux.

1.3 Faits simples et élémentaires sur l'électricité

Le volume 1 de cet ouvrage présentait les fondements expérimentaux et conceptuels de l'électricité. Chaque sujet était introduit par quelques expériences simples. Les concepts de base ont été formulés à partir des résultats de ces expériences. La section 8.2 de ce volume énumérait les faits ou principes simples et primitifs concernant l'électricité.⁹ Cette section présente à nouveau ces faits fondamentaux, sans les expliquer, mais en décrivant uniquement les principes observés dans le comportement des corps. Ils sont traités ici comme des concepts primitifs. Ils peuvent être utilisés

⁴[Far43a, article 2107].

⁵2107. Having thus given the result of the friction of the steam and water against so many bodies, I may here point out the remarkable circumstance of water being *positive* to them all. It very probably will find its place above all other substances, even cat's hair and oxalate of lime (2131).

⁶[BGP16] et [GB17, section 6.5].

⁷[Gre94] et [Mil17, p. 66].

⁸The droplets [...] were found in general to have been strongly charged by the frictional process in blowing the [oil] spray [through a small orifice] [...]

⁹Section 8.2 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

pour expliquer d'autres phénomènes et des expériences plus complexes, bien que ces faits fondamentaux ne soient pas expliqués. Il n'est jamais possible de tout expliquer. Nous devons toujours commencer par quelques concepts fondamentaux et des phénomènes inexpliqués qui doivent être considérés comme des faits réels de la nature. Ces principes fondamentaux peuvent ensuite être utilisés pour expliquer des phénomènes plus complexes et d'autres observations de la nature. Nous devons toujours partir de quelques principes ou postulats fondamentaux. Ces principes peuvent être utilisés pour déduire d'autres résultats. Voici les faits ou principes simples et primitifs liés à l'électricité :

1. Les corps naturels peuvent se trouver dans trois états différents, à savoir (a) électriquement neutres, non électrisés, déchargés ou sans charge électrique; (b) chargés positivement ou électrisés positivement; et (c) chargés négativement ou électrisés négativement. Ils ont respectivement une charge nulle, une charge positive et une charge négative. Par « charge électrique », qu'elle soit positive ou négative, il faut entendre un « corps électrisé » ou une « particule électrisée ». Les corps dans ces trois états différents ont respectivement : (a) une charge nette nulle, une charge résultante nulle ou une charge totale nulle; (b) une charge nette positive, une charge résultante positive ou une charge totale positive; et (c) une charge nette négative, une charge résultante négative ou une charge totale négative.
2. Ces états sont caractérisés par le comportement observé des corps. Deux corps neutres ne s'attirent ni ne se repoussent, sauf lorsqu'ils sont polarisés (cette condition de polarisation sera clarifiée dans un autre point). Il existe une attraction entre un corps positif et un corps initialement neutre. Il existe également une attraction entre un corps négatif et un corps initialement neutre.
3. Les corps ayant des charges de signe opposé s'attirent mutuellement. Les corps ayant des charges de même signe se repoussent normalement, mais dans certaines situations, ils peuvent également s'attirer mutuellement.¹⁰
4. Ces forces d'attraction et de répulsion augmentent en intensité lorsque la distance entre les corps en interaction diminue. L'intensité de ces forces augmente également lorsque la force de la charge dans les corps augmente (ou lorsqu'il y a une augmentation de l'électrisation de ces corps). Ces forces sont mutuelles, agissant avec la même intensité sur les deux corps en interaction. Elles sont dirigées le long de la ligne droite reliant les corps, bien qu'elles agissent dans des directions opposées dans chaque corps. Elles sont appelées forces électrostatiques ou coulombiques.
5. Les corps peuvent être divisés en deux groupes appelés conducteurs et isolants. La principale différence entre ces deux groupes est que les conducteurs ont des particules électrisées mobiles qui peuvent se déplacer dans tout le volume du

¹⁰Comme le montrent les expériences de la section 7.10 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

conducteur. Les conducteurs permettent le passage ou le flux de charges électriques à travers leur corps et le long de leur surface. Les isolants, en revanche, ne possèdent pas de particules électrisées mobiles pouvant se déplacer le long du corps de l'isolant. Les particules électrisées appartenant aux isolants ne peuvent se déplacer qu'à l'intérieur de leurs molécules. Les isolants ne permettent pas le passage ou le flux de charges à travers leur corps ni le long de leur surface.

6. Les conducteurs et les isolants peuvent être électriquement neutres, positifs ou négatifs.
7. Les corps peuvent être classés en conducteurs et isolants à l'aide d'un électroscope chargé, comme cela sera décrit dans la section 3.1. Une extrémité du corps doit toucher le carton de l'électroscope tandis que l'autre extrémité du corps doit être mise en contact avec le sol. Les corps qui déchargent l'électroscope sont appelés conducteurs, tandis que les corps qui ne déchargent pas l'électroscope sont appelés isolants.
8. Lorsqu'un conducteur chargé touche le sol, il se décharge. Ce processus est appelé mise à la terre. La même décharge ne se produit pas pour un isolant chargé qui touche le sol.
9. La plupart des corps solides et liquides se comportent comme des conducteurs dans les expériences habituelles d'électrostatique, seuls quelques-uns sont des isolants. Liste de quelques isolants : air sec, ambre, soie, huile végétale, la plupart des plastiques et des résines.
10. Les corps peuvent également être classés en conducteurs et isolants à l'aide d'un testeur de circuit, comme décrit dans la section 3.2. Nous montons un circuit contenant un morceau de fil A , une batterie, un morceau de fil intermédiaire, une ampoule et un autre morceau de fil B . Connectez les fils A et B au corps testé. Lorsque l'ampoule s'allume, le corps testé est appelé conducteur. Lorsque l'ampoule ne s'allume pas, le corps testé est appelé isolant.
11. Un corps qui se comporte comme un isolant lorsqu'il est soumis à une faible différence de potentiel électrique (généralement jusqu'à quelques centaines de volts) peut se comporter comme un conducteur lorsque cette différence de potentiel dépasse une certaine valeur. Dans les expériences habituelles d'électrostatique, nous traitons des différences de potentiel élevées, allant généralement de 1 000 à 10 000 volts. Dans ces cas, la majorité des corps solides et liquides se comportent comme des conducteurs, tandis que seuls quelques-uns de ces corps se comportent comme des isolants.
12. Le comportement d'un corps en tant que conducteur ou isolant dépend également d'autres facteurs. Supposons qu'une extrémité du corps touche le carton d'un électroscope chargé, tandis qu'une autre extrémité du corps touche le sol. Les facteurs qui influencent les propriétés de ce corps sont les suivants : (a) L'intervalle de temps nécessaire pour décharger l'électroscope (plus le temps de contact est long, plus la quantité de décharge sera importante); (b) La longueur

du corps (plus cette longueur est grande, plus la décharge sera lente); (c) La section transversale du corps (plus cette section est grande, plus la décharge sera rapide). Le chapitre 3 de cet ouvrage présente une étude détaillée de ces facteurs.

13. Les corps neutres peuvent être chargés par plusieurs mécanismes. La procédure la plus courante est le frottement de deux corps neutres. Ces deux corps peuvent être deux isolants, deux conducteurs ou un isolant et un conducteur. Après le frottement, l'un des corps frottés devient positif et l'autre négatif. Lequel deviendra positif ou négatif dépendra de leur emplacement dans la série dite triboélectrique. Cette série est établie empiriquement. De plus, afin de collecter les charges du conducteur qui est frotté, celui-ci doit être complètement isolé du sol. Il peut, par exemple, être tenu à l'aide d'une poignée isolante.
14. Les isolants ne sont chargés que sur la partie frottée de leur surface. En revanche, les charges acquises par les conducteurs frottés se répartissent sur leur surface extérieure lorsque les conducteurs sont complètement entourés d'isolants. Si le conducteur frotté est connecté à la terre (directement ou par l'intermédiaire d'un autre corps conducteur), la charge qu'il a acquise par frottement est immédiatement neutralisée par la terre.
15. Un conducteur neutre peut également acquérir une charge à partir d'un isolant électrisé lorsqu'ils sont mis en contact l'un avec l'autre, sans aucun frottement. Un exemple de ce processus utilise un disque de papier suspendu à un fil de soie dans un pendule électrique. Le disque de papier est attiré par un plastique électrisé à proximité, touche ce plastique, puis en est repoussé. Ce mécanisme est appelé *ACR*, à savoir attraction, communication d'électricité et répulsion. La section 4.4 analyse ce mécanisme. La charge acquise par le conducteur a le même signe que la charge de l'isolant électrisé. Dans ce processus, la quantité de charge perdue par l'isolant est égale à celle gagnée par le conducteur. D'autre part, la quantité de charge acquise par un isolant neutre lorsqu'il touche un autre isolant électrisé est négligeable lorsqu'il n'y a pas de frottement entre eux, à condition qu'ils ne soient pas frottés l'un contre l'autre.
16. Les conducteurs isolés du sol se polarisent électriquement en présence d'un corps chargé à proximité. La partie du conducteur la plus proche du corps chargé se charge d'une charge de signe opposé à celle du corps chargé à proximité. La partie la plus éloignée du conducteur se charge d'une charge de même signe que le corps à proximité lorsque le conducteur est isolé électriquement. Si le conducteur est isolé et si les deux parties sont séparées en présence du corps chargé proche, les deux parties se chargent électriquement avec des charges de signe opposé.
17. Si le conducteur est mis à la terre électriquement en présence du corps chargé proche, la partie du conducteur la plus proche du corps chargé se charge électriquement avec une charge de signe opposé à celui du corps chargé proche. La partie du conducteur la plus éloignée du corps chargé sera neutralisée par la Terre. Si nous supprimons ensuite la mise à la terre alors que le corps chargé

reste proche du conducteur, le conducteur sera chargé d'une charge de signe opposé à celui du corps proche.

18. Les molécules d'un isolant sont polarisées en présence d'un corps chargé à proximité. La partie de toute molécule qui est plus proche (plus éloignée) du corps chargé se charge d'un signe opposé (identique) à celui du corps chargé. Ces charges polarisées sont limitées aux molécules et ne se déplacent pas le long de l'isolant. De plus, elles ne passent pas à un autre conducteur qui entre en contact avec l'isolant.
19. Le nombre de particules positives et négatives dans les conducteurs polarisés proches d'un corps chargé augmente lorsque la distance entre le conducteur et le corps chargé diminue. Il en va de même pour les charges polarisées effectives des isolants proches d'un corps chargé.
20. La polarisation des conducteurs et des isolants est plus élevée lorsque le degré d'électrisation du corps chargé proche augmente.
21. Une force d'origine non électrostatique maintient les particules électrisées à la surface des conducteurs et des isolants au repos lorsque ces corps sont électrisés ou polarisés.
22. Une force d'origine non électrostatique est également responsable de la génération de charges opposées lorsque deux corps sont frottés l'un contre l'autre. Le chapitre 14 présente des exemples de plusieurs situations nécessitant l'existence de ces forces d'origine non électrostatique.

Lorsque nous décrivons ces faits simples, gardez à l'esprit que nous parlons en termes généraux, en nous référant implicitement aux expériences décrites dans le volume 1 de cet ouvrage. Tous ces effets dépendent de l'ordre de grandeur impliqué dans les expériences, il y a toujours des exceptions dans toutes les descriptions expérimentales. Par exemple, lorsque nous disons que deux corps neutres n'interagissent pas l'un avec l'autre, nous ne tenons pas compte des attractions gravitationnelles entre eux. La raison en est que cette interaction gravitationnelle n'est pas observable par nos sens ou ne peut être détectée dans des expériences ordinaires impliquant des corps petits et légers. La gravitation ne montre son effet que lorsqu'au moins l'un des corps a des dimensions astronomiques, comme la planète Terre. Lorsque nous disons qu'un corps chargé attire un corps initialement neutre, nous supposons que les corps sont légers ou soutenus par des fils, de telle sorte qu'il n'y ait qu'une faible résistance au mouvement latéral de ces corps. Si tel est le cas, ces corps initialement neutres pourront se déplacer vers le corps chargé lorsqu'il y a une attraction entre eux. De plus, pour que cette attraction soit observable, la distance entre les corps en interaction ne doit pas être très grande et la charge du corps frotté ne doit pas être très faible, sinon ces effets ne sont pas perceptibles. Des conditions similaires s'appliquent aux autres principes.

1.3.1 Nous n'expliquons pas ces faits, ils ont simplement été énumérés

Ces faits simples et primitifs concernant l'électricité n'ont pas été expliqués. De même, plusieurs éléments n'ont pas été justifiés :

- L'existence de deux types d'électricité (positive et négative) au lieu d'un, trois, quatre, ... ou même d'un nombre infini de types d'électricité différents.
- Les raisons pour lesquelles les charges de signe opposé s'attirent, tandis que les charges de même signe se repoussent.
- La raison pour laquelle la force électrostatique dépend de la distance entre les corps en interaction.
- Les mécanismes responsables de l'électrisation par frottement.
- L'ordre de la série triboélectrique. Autrement dit, nous n'expliquons pas pourquoi un certain corps devient électrisé positivement et un autre corps électrisé négativement lorsqu'ils sont frottés l'un contre l'autre.
- L'origine de la force non électrostatique responsable de la séparation de charges opposées dans l'effet de l'ambre.
- La raison pour laquelle certains corps se comportent comme des conducteurs tandis que d'autres se comportent comme des isolants.
- La raison pour laquelle la conductivité d'un corps dépend de plusieurs facteurs tels que : la différence de potentiel agissant entre ses extrémités, la longueur et la section transversale du corps, sa température, etc.
- L'origine de la force non électrostatique responsable du maintien au repos des particules électrisées dans les conducteurs et les isolants qui sont chargés ou électrisés.
- Etc.

1.3.2 Signification de certaines expressions

Il convient ici de mentionner une distinction pertinente présentée par Gaspar concernant certaines expressions simples généralement utilisées dans les manuels de physique, à savoir :¹¹

Certains auteurs mentionnent qu'« une masse m exerce une force » ou qu'« une charge q exerce une force ». Ces deux expressions sont physiquement incorrectes. La masse et la charge sont des propriétés de la matière, mais elles ne sont pas des choses en soi. Un corps, une particule, un point matériel ou un concept similaire est l'entité qui peut exercer une force sur un autre corps. Un corps a une masse et peut avoir une charge électrique. Mais il n'y a pas de masse sans corps. De même, il n'y a

¹¹[Gas00, p. 22] et [Gas13, p. 25].

pas de charge sans corps. Par conséquent, si nous voulons parler correctement, il est incorrect de mentionner une « masse m » ou une « charge q » sans faire référence au corps qui porte cette masse ou cette charge électrique. Normalement, le corps portant la masse ou la charge est implicitement supposé dans ces expressions. Quoi qu'il en soit, l'omission du corps lorsqu'on fait référence à une masse m ou à une charge q ne contribue pas à la compréhension du concept. C'est pourquoi nous devons éviter ces expressions.

Nous sommes d'accord avec ces points de vue présentés par Gaspar.

Ce livre ne présente qu'une description macroscopique des phénomènes. Nous ne présenterons pas en détail le modèle atomique. Nous parlerons ensuite de corps électrisés ou de particules électrisées.

Chapitre 2

Instrumentes électriques

Ce chapitre présente certains des principaux instruments électriques utilisés dans cet ouvrage.

2.1 Liste du matériel nécessaire pour les expériences

Nous énumérons ici certains des principaux matériaux utilisés dans les expériences suivantes. Il peut être utile de rassembler ces éléments à l'avance.

- Pailles en plastique, une règle en acrylique et un tube en PVC.
- Serviettes en papier et sacs en plastique.
- Carton fin ou carton épais.
- Papier (format A4 ou lettre) et feuille d'aluminium.
- Papier de soie (utilisé pour fabriquer des cerfs-volants ou pour emballer des cadeaux fragiles).
- Bobine de fil de soie (ou bobine de fil synthétique en polyamide, comme le nylon, ou en polyester).
- Bobine de fil de coton et ficelle.
- Attaches-papier, épingles, aiguilles et clous.
- Bouchons en liège.
- Huile végétale de cuisine.
- Brochettes en bois et fils métalliques.
- Les supports pour les pendules électriques et les électroscopes sont fabriqués à partir de gobelets en plastique fins, d'attaches-papier et de pâte de plâtre.

- Fil de cuivre isolé, piles et ampoules de lampe de poche.
- Lampe au néon et LED (diode électroluminescente). Ces deux éléments ne sont pas indispensables.
- Rubans adhésifs (comme le ruban de bureau PSA, le ruban magique, le ruban invisible, le ruban collant, le ruban cellophane, le ruban chirurgical ou médical, le ruban électrique ou isolant).
- Canettes de boisson.
- Bouteilles en plastique (200 ou 300 ml).
- Tasses en verre, en métal et en plastique.
- Moule à pizza, moules à tarte en métal, louches en aluminium ou en fer.
- Les électrets seront fabriqués à partir de paraffine obtenue à partir de bougies ou achetée en barres ou en tablettes. Certains électrets seront fabriqués à partir de cire de carnauba, mais il n'est pas indispensable de se procurer ce matériau s'il est difficile à trouver.
- Certains autres matériaux spécifiques décrits dans les sections appropriées.

2.2 L'électroscope : l'instrument le plus important de l'électrostatique

Dans le volume 1 de cet ouvrage, nous avons construit plusieurs appareils électriques, à savoir le perpendiculaire, le versorium métallique, le versorium de Du Fay, le pendule électrique, le fil pendulaire, l'électroscope et le collecteur de charge. L'électroscope est sans aucun doute l'instrument le plus important, car il permet de distinguer de manière pratique les conducteurs des isolants. Avant de commencer toute expérience électrique ou la construction de tout appareil, testez les matériaux à utiliser afin de savoir s'ils conduisent l'électricité ou non. Ce test est très important. De nombreuses expériences ne fonctionneront pas ou ne fonctionneront pas correctement parce que les gens ne tiennent pas compte de cet aspect crucial. On pourrait penser, par exemple, qu'un morceau de caoutchouc sera un isolant simplement parce qu'il est fait de caoutchouc. Cependant, en réalité, de nombreux types de caoutchouc se comportent comme des conducteurs dans les expériences électrostatiques. Si le corps ou l'instrument étudié ou utilisé est relié à la terre par l'intermédiaire d'un de ces morceaux de caoutchouc, aucune charge électrique ne s'accumulera dans le corps ou l'instrument en raison de la mise à la terre. Par conséquent, les effets électriques recherchés ne seront pas présents. La personne réalisant cette expérience et ignorant ce fait important sera frustrée. Elle ne comprendra pas pourquoi l'expérience a échoué ni la raison du mauvais fonctionnement de son instrument.

Le support qui sera utilisé dans la plupart des expériences avec l'électroscope et le pendule électrique est constitué d'une fine tasse à café en plastique. Percez un petit

trou dans le fond de la tasse et passez les deux pattes d'une attache-papier à travers. La tasse est placée avec son ouverture vers le haut. Remplissez-la de pâte de gypse humide ou de ciment blanc humide. Elle séchera dans cette position. Elle sera utilisée avec l'ouverture de la tasse tournée vers le bas et l'attache-papier pointant vers le haut, figure 2.1.

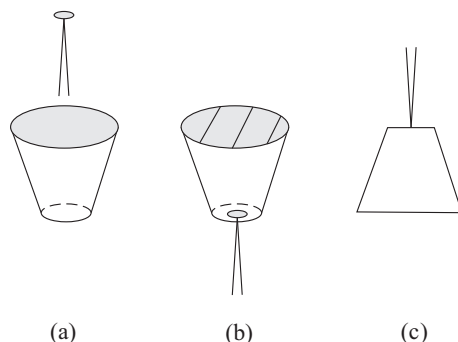


FIG. 2.1 : (a) Gobelet en plastique fin et attache-papier. (b) Gobelet rempli de pâte de gypse humide. (c) Support pour le pendule électrique et l'électroscope.

D'autres supports peuvent également être utilisés. Par exemple, un morceau de pâte à modeler dans lequel on enfonce un clou ou une attache-papier. Le clou ou l'attache-papier sera placé à l'intérieur de la paille afin de la maintenir en position verticale. Il convient donc de choisir un clou ou une attache-papier dont l'épaisseur et la longueur sont adaptées.¹ Un autre exemple est une planche en bois, une assiette ou une tasse en plastique ou en polystyrène avec un trou au milieu pour fixer la paille verticale.²

Nous présentons ici l'électroscope simple utilisé dans toutes les expériences du volume 1 de cet ouvrage, figure 2.2.³

Le carton fin peut avoir, par exemple, des côtés de 7 cm sur 10 cm, le côté le plus long étant vertical. Fixez le rectangle à une paille en plastique à l'aide de deux morceaux de ruban adhésif. Le ruban doit être appliqué à l'arrière du rectangle, sans dépasser des bords. L'extrémité supérieure de la paille doit rester proche du bord supérieur du rectangle, sans le dépasser. Découpez une petite bande de papier de soie, de 1 à 3 mm de large et de 6 à 9 cm de long. Les effets décrits dans ce livre sont plus visibles lorsque vous utilisez une bande très fine et légère. Le papier de soie peut être celui utilisé pour fabriquer des cerfs-volants ou pour emballer des cadeaux fragiles. Collez l'extrémité supérieure de cette bande au milieu de la partie supérieure du rectangle. La bande ne doit pas être pliée et ne doit pas dépasser le bord inférieur du rectangle. Au lieu de colle, la bande peut également être fixée à l'aide d'un petit morceau de ruban adhésif, à condition que celui-ci ne dépasse pas le bord du rectangle, figure 2.3.

¹[FM91, p. 10], [Fersdb, Material para experiências em eletrostática, pp. 1–2], section 4.4 de [Ass10b],

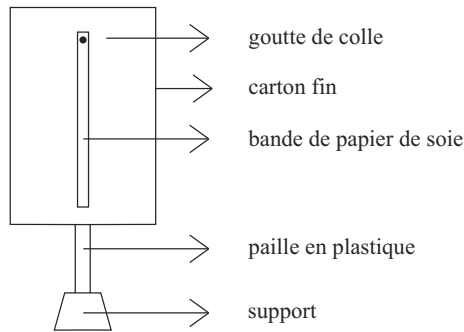


FIG. 2.2 : Électroscope vu de face.

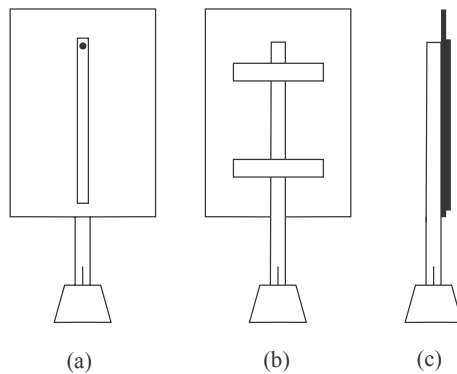


FIG. 2.3 : (a) Électroscope classique vu de face. (b) Vue arrière. (c) Vue de profil.

2.2.1 Principaux composants d'un électroscope

Le carton fin et la bande de papier de soie se comportent comme des conducteurs dans les expériences habituelles d'électrostatique. L'air sec autour de l'électroscope se comporte comme un isolant. La paille en plastique qui soutient le rectangle se comporte également comme un isolant, ce qui en fait l'élément le plus important de l'électroscope. Elle empêche la décharge de l'électroscope vers le sol. La figure 2.4 présente les principaux composants d'un électroscope.

La paille en plastique ne peut pas être remplacée par une brochette en bois ou un fil métallique. En effet, ces deux matériaux sont des conducteurs électrostatiques. Si une brochette en bois remplaçait la paille en plastique, l'électroscope se déchargerait toujours au sol dès que son carton serait raclé avec une règle en acrylique électrisée. Il serait donc impossible de le maintenir électrisé après l'avoir raclé.

[Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

²[Gas03, pp. 225–6].

³Sections 6.1 et 6.5 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

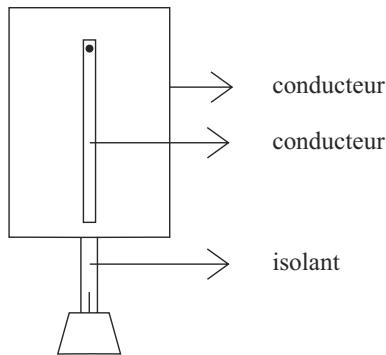


FIG. 2.4 : Composants d'un électroscope.

2.2.2 Comparaison entre l'électroscope à feuilles d'or et l'électroscope fabriqué à partir de matériaux peu coûteux

Les manuels scolaires modernes présentent l'électroscope lorsqu'ils traitent des conducteurs et des isolants, ou lorsqu'ils abordent l'électrisation par induction ou polarisation. Ils ne mentionnent généralement que l'électroscope à feuilles d'or. Celui-ci comporte deux feuilles d'or mobiles qui se séparent lorsqu'elles sont électrisées. Ces manuels n'expliquent généralement pas comment fabriquer un électroscope à partir de matériaux simples et bon marché.

Cependant, l'électroscope présenté dans cette section fonctionne parfaitement, tout comme n'importe quel électroscope à feuilles d'or. Il est extrêmement sensible. Sa bande de papier de soie se soulève facilement, même lorsque l'instrument est faiblement électrisé. Cette bande est très légère. Elle n'est fixée au carton que par son extrémité supérieure à l'aide d'une goutte de colle. Le reste de la bande peut s'éloigner facilement du carton, sans aucune entrave, dès que l'instrument acquiert une petite quantité de charge. La paille en plastique est un excellent isolant, empêchant la perte de charge vers le sol, en particulier par temps sec et froid.

Le principal avantage de cet instrument simple par rapport à l'électroscope à feuilles d'or est qu'il peut être facilement fabriqué par l'enseignant ou par chaque élève. Il ne coûte presque rien. Il est très sensible et permet de réaliser d'innombrables expériences. Cela offre une grande autonomie aux élèves. Ils peuvent facilement acquérir des connaissances de première main en électricité grâce à lui.

Un élève normal n'essaiera pas de construire un électroscope à feuilles d'or. Après tout, cet instrument doit être extrêmement coûteux car il contient de l'or. Ce simple fait suggère que cet appareil est difficile à construire et doit avoir été fabriqué par des spécialistes. De nombreux élèves peuvent même imaginer qu'il y a un vide à l'intérieur de la bouteille en verre qui protège l'électroscope. La plupart des élèves deviennent apathiques face à la description trouvée dans les manuels scolaires. Elle ne stimule pas leur créativité et ne suggère pas qu'ils pourraient construire un instrument similaire avec des matériaux simples. Beaucoup d'entre eux n'essaieront jamais ces expériences simples de leurs propres mains, se limitant aux descriptions trouvées dans les manuels.

2.2.3 L'électroscope et la découverte des rayons cosmiques

Afin d'illustrer l'importance de l'électroscope, nous mentionnons ici la découverte des rayons cosmiques. On savait depuis longtemps qu'un électroscope chargé se décharge lentement dans l'air. L'une des raisons de la conductivité de l'air est la présence d'ions chargés dans l'atmosphère, c'est-à-dire l'existence de particules électrisées mobiles. En 1896, Henri Becquerel (1852–1908) a vérifié que les sels d'uranium émettaient des rayons ionisants qui augmentaient la conductivité de l'air. Les rayons γ (rayonnement électromagnétique à haute fréquence), en particulier, possèdent cette propriété ionisante. Ils pénètrent dans l'air jusqu'à une certaine distance, jusqu'à ce qu'ils interagissent avec des atomes neutres, les ionisant. Afin d'étudier l'origine de l'ionisation de l'air, au début du XIX^e siècle, les scientifiques ont commencé à étudier la conductivité atmosphérique à différentes altitudes par rapport au sol. La plupart des chercheurs de cette époque pensaient que l'origine du rayonnement ionisant se trouvait à l'intérieur de la Terre, en raison de la présence de substances radioactives. Les recherches fondamentales sur ce sujet ont été menées par le scientifique Victor Franz Hess (1883–1964). Ses principales recherches sur les rayons cosmiques ont été réalisées entre 1911 et 1913. Au cours de cette période, il a effectué des vols en ballon équipé d'électroscopes mis au point par Theodor Wulf (1868–1946), dans lesquels l'électrisation était indiquée par la distance de séparation entre deux fils conducteurs. Hess a électrisé ses électroscopes jusqu'à une certaine distance entre les fils conducteurs et a mesuré l'intervalle de temps nécessaire pour décharger les électroscopes en fonction de l'altitude du ballon. Il a effectué des vols jusqu'à 5,3 km au-dessus du niveau de la mer. Il a constaté que le niveau de rayonnement diminuait jusqu'à une altitude d'environ 1 km, puis augmentait considérablement au-delà de cette hauteur, atteignant jusqu'à deux fois le rayonnement au niveau de la mer lorsqu'il se trouvait à une altitude de 5 km. Il en a alors conclu que le principal rayonnement ionisant provenait de l'espace et n'avait pas d'origine terrestre. Il a également volé pendant une éclipse solaire et de nuit, concluant que le niveau de rayonnement avait une valeur proche de celle observée pendant la journée et que le Soleil n'était pas la source de ce rayonnement. Sa conclusion finale était que le rayonnement pénétrant l'atmosphère, qu'il a nommé « ultra-rayonnement », provenait de l'espace. Le nom actuel, « rayonnement cosmique », a été introduit par Robert A. Millikan en 1925. Il a mené des recherches sur les rayons cosmiques et l'effet photoélectrique, et a reçu le prix Nobel en 1923 pour sa mesure de la charge de l'électron, comme indiqué dans la sous-section 1.2.1. Hess reçut le prix Nobel de physique en 1936 pour sa découverte du rayonnement cosmique, qu'il partagea avec Carl David Anderson (1905–1991), un physicien américain qui découvrit le positron en 1932.

L'électroscope fut essentiel pour créer un tout nouveau domaine de recherche en physique, à savoir le rayonnement cosmique.

2.3 Le versorium

Les instruments électriques les plus anciens sont le perpendiculaire de Girolamo Fracastoro (1478–1553) et le versorium de William Gilbert (1544–1603).⁴ Nous présentons ici les principaux types de versoria.

2.3.1 Le versorium métallique soutenu par une épingle

Un versorium simple peut être fabriqué à partir d'une attache-papier en laiton ou en acier. Le centre de la base circulaire de l'attache-papier doit être légèrement courbé. Il sera soutenu par une épingle fixée sur une base rigide. Pour courber ou déformer le centre de l'attache-papier, utilisez un clou et un marteau, mais avec précaution, sans percer de trou dans la partie supérieure de l'attache, en la courbant légèrement pour créer une petite indentation. L'attache-papier sera soutenue par cette partie pliée placée sur la pointe de l'épingle de manière à ne pas glisser de l'épingle. Une fois les pattes de l'attache-papier pliées vers le bas, de manière à former un V à l'envers, l'attache-papier peut être placée sur l'épingle. Elle doit pouvoir tourner librement autour de l'épingle, figure 2.5.

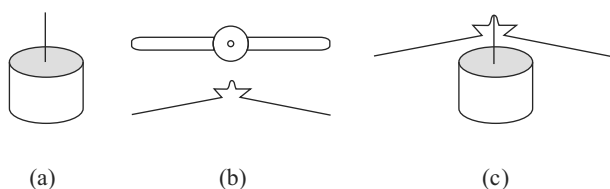


FIG. 2.5 : Versorium métallique. (a) Base du versorium. (b) Attache-papier en acier vue de dessus et de côté. (c) Le versorium monté.

2.3.2 Le versorium métallique soutenu par un morceau de plastique pointu

Le versorium métallique de cette sous-section est soutenu par un morceau de plastique pointu. La principale différence par rapport au versorium de la sous-section 2.3.1 est que le plastique agit comme un isolant. Ainsi, l'attache-papier sera isolée du sol, ce qui lui permettra de conserver sa charge nette après avoir été électrisée. Lorsqu'un corps électrisé se trouve à proximité, le versorium isolé se polarise.

Ce versorium se fabrique en quelques étapes simples. Tout d'abord, découpez un petit morceau de paille en plastique de 5 cm de long. Affûtez l'une de ses extrémités avec des ciseaux, puis placez-la sur le support de l'électroscope de la figure 2.1, comme le montre la figure 2.6 (a). Ensuite, montez l'attache-papier de la figure 2.5 (b) sur ce morceau de plastique pointu, comme le montre la figure 2.6 (c).

⁴Chapitre 3 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

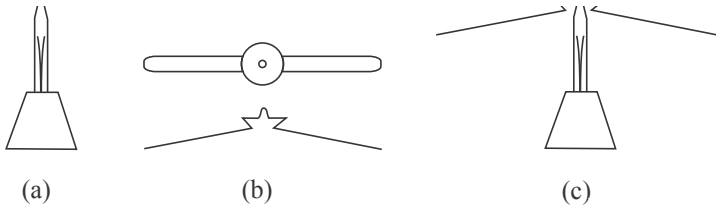


FIG. 2.6 : Versorium métallique soutenu par une paille en plastique pointue. (a) Support de la figure 2.1 avec une paille en plastique pointue autour des deux pattes d'une attache-papier fixée dans de la pâte de gypse. (b) Attache-papier en acier vue de dessus et de côté. (c) Versorium métallique monté sur une paille en plastique pointue.

2.3.3 Le versorium en plastique

La figure 2.7 représente le versorium en plastique. Sa base, dans ce cas un clou enfoncé dans une planche, apparaît dans la figure 2.7 (a). La figure 2.7 (b) montre la partie mobile du versorium, dans ce cas une bande de plastique avec une épingle fixée en son centre, dont la pointe est orientée vers le bas. Nous appellerons cette partie mobile le « chapeau » du versorium. Il doit s'agir d'une bande de plastique. L'épingle est solidement fixée au centre du chapeau, sa pointe étant orientée vers le bas. L'épingle tourne avec le chapeau par rapport au sol. Ce système est ensuite soutenu par une petite surface plane horizontale qui est fixe par rapport au sol, comme la tête d'un clou enfoncé dans une planche ou un bouchon. Le versorium complet apparaît dans la figure 2.7 (c), la pointe de l'épingle étant posée sur la tête horizontale du clou enfoncé dans une planche.

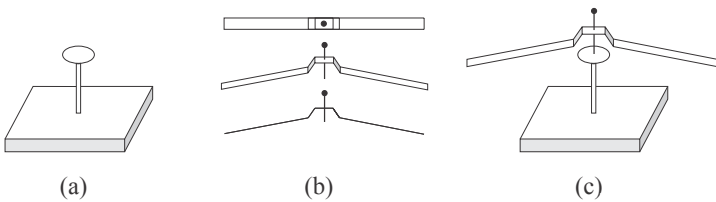


FIG. 2.7 : Versorium en plastique avec l'épingle fixée au centre de la bande isolante. (a) Base fixe du versorium. (b) Chapeau du versorium (bande en plastique) avec l'épingle fixée dessus. (c) Versorium monté.

Important : afin d'éviter que le versorium ne glisse, il est essentiel que le centre de gravité du chapeau et de l'épingle soit plus bas que la pointe de l'épingle.

2.3.4 Le versorium de Du Fay

Le versorium de Du Fay peut être composé de plastique avec un morceau de feuille d'aluminium à l'une de ses extrémités, figure 2.8.

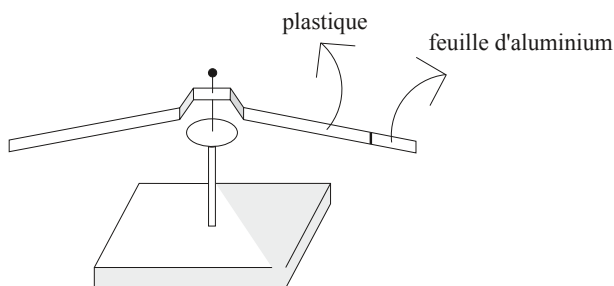


FIG. 2.8 : Le versorium de Du Fay.

2.3.5 Principaux composants de ces versoria

Les principaux composants de ces quatre types de versoria sont présentés dans la figure 2.9.

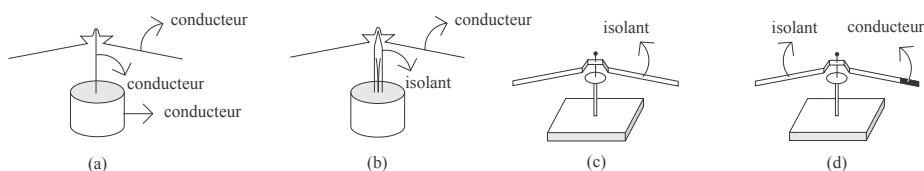


FIG. 2.9 : Composants des différents types de versoria. (a) Versorium métallique soutenu par une épingle métallique. (b) Versorium métallique soutenu par une paille en plastique pointue. (c) Versorium en plastique. (d) Versorium de Du Fay.

Dans le cas d'un versorium métallique soutenu par une épingle métallique, figure 2.9 (a), il y a une bande conductrice horizontale (comme l'attache-papier en acier) soutenue par une épingle conductrice verticale fixée à une planche de bois ou à un bouchon. Autrement dit, tous les éléments de ce versorium sont des conducteurs. Le versorium métallique soutenu par une paille en plastique pointue, figure 2.9 (b), comporte une bande conductrice soutenue par un matériau isolant pointu. Le versorium en plastique, figure 2.9 (c), comporte un chapeau isolant. L'épingle qui traverse son centre est conductrice, bien que sa composition ne soit pas pertinente pour les expériences. Le versorium de Du Fay, en revanche, figure 2.9 (d), est composé d'un chapeau en plastique isolant muni d'un conducteur à l'une de ses extrémités, à savoir la feuille d'aluminium. Le fait que l'épingle qui traverse son centre soit en matériau conducteur ou isolant n'a pas d'importance.

2.4 Le pendule électrique

Cette section présente les principaux types de pendules électriques.⁵

2.4.1 Le pendule électrique classique

Le pendule électrique classique est présenté dans la figure 2.10.

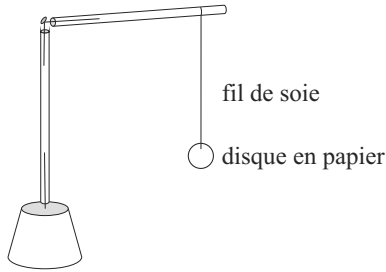


Fig. 2.10 : Pendule électrique avec support.

Attachez un disque de papier ou de feuille d'aluminium à l'extrémité libre inférieure d'un fil en soie, en polyester ou en polyamide (comme le nylon). L'extrémité supérieure de ce fil est attachée à une paille en plastique. Cette paille en plastique est reliée à angle droit à une autre paille en plastique à l'aide d'une attache-papier. La paille en plastique verticale est soutenue par une attache-papier fixée dans de la pâte de gypse à l'intérieur d'une fine tasse à café en plastique, figure 2.1.

2.4.2 Le pendule fléché

Une variante de ce pendule classique remplace le disque de papier ou de feuille d'aluminium par une petite flèche en papier, en feuille d'aluminium ou en carton fin. On peut l'appeler un « pendule fléché ». La flèche doit pointer horizontalement et être suspendue en son centre par un fil de soie ou de nylon. Elle peut mesurer entre 2 et 5 cm de long, avec une largeur verticale de 0,2 à 0,5 cm, et une largeur maximale de la pointe de 0,5 à 0,7 cm. Ces mesures sont approximatives et ne sont pas essentielles. La flèche peut être attachée directement à l'extrémité du fil de soie, comme dans la figure 2.11 (a). Elle peut également être fixée autour d'un petit morceau de paille en plastique, comme dans la figure 2.11 (b).

2.4.3 Le pendule en plastique

Construisez maintenant un pendule électrique en plastique, également appelé pendule en plastique. Il suffit de remplacer le disque en papier du pendule électrique clas-

⁵[FM91, p. 47], [Fersdb, Eletrizacão por contato : Pêndulo, p. 8; Eletrizacão por indução : Pêndulo, p. 14; e Campo elétrico : Vetor, p. 22], [Gas03, pp. 228–229], ainsi que les sections 4.4, 4.10 et 7.6 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

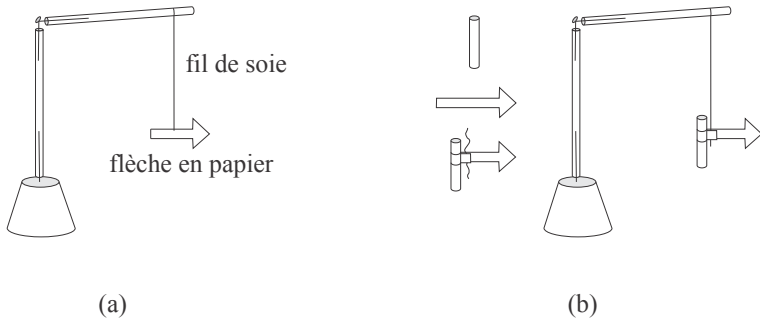


FIG. 2.11 : Pendule électrique avec une flèche suspendue.

sique par un petit disque en plastique, figure 2.12. Le plastique doit être fin et léger, comme les sacs en plastique utilisés dans les supermarchés.

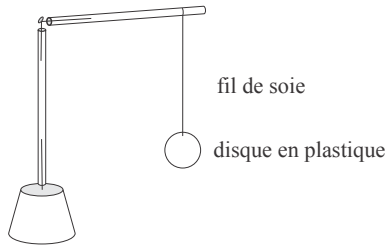


FIG. 2.12 : Le pendule en plastique.

2.4.4 Principaux composants de ces pendules

Les principaux composants de ces pendules sont indiqués dans la figure 2.13.

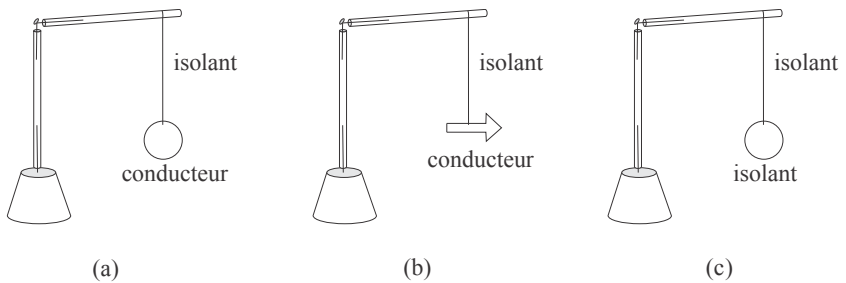


FIG. 2.13 : (a) Pendule électrique classique. (b) Pendule fléché. (c) Pendule en plastique.

2.5 Fil pendulaire de Gray

Nous présentons le « fil pendulaire » créé par Stephen Gray (1666–1736) en 1729.⁶

Il s'agit simplement d'un fil de coton ou de lin soutenu par le haut par une brochette en bois, figure 2.14 (a). Le pendule électrique a été fabriqué avec un fil de soie ou de nylon. Ici, il est important d'utiliser un fil de coton ou de lin. Tenez la brochette à la main ou fixez-la à un autre support approprié.

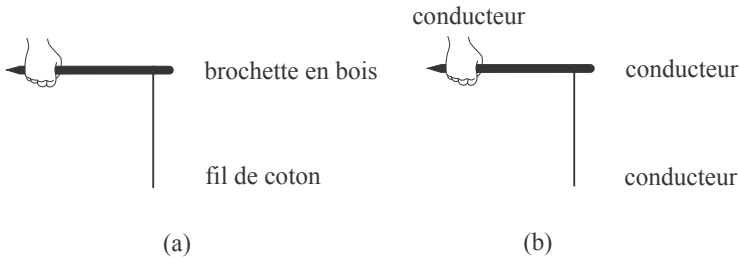


FIG. 2.14 : (a) Fil pendulaire de Gray. (b) Principaux composants de cet instrument.

Les principaux composants du fil pendulaire de Gray sont présentés dans la figure 2.14 (b), à savoir un fil conducteur soutenu par un conducteur mis à la terre.

Gray utilisait son fil pendulaire pour tester si un corps était chargé. Pour ce faire, il approchait simplement le fil du corps. Lorsque le fil était attiré par le corps et s'inclinait vers lui, cela signifiait que l'objet était chargé électriquement. Lorsque le fil restait vertical, cela signifiait que le corps proche n'était pas électrisé.

2.6 Collecteurs de charge

Les collecteurs de charge sont des instruments utilisés pour obtenir des particules électrisées à partir de n'importe quelle région d'un conducteur électrisé ou polarisé.⁷ Une fois ces charges collectées, il est possible de déterminer leur signe (si elles sont positives ou négatives) ainsi que leur magnitude (c'est-à-dire de connaître la densité de charge superficielle). Ils peuvent également être utilisés pour transporter des particules électrisées entre deux conducteurs séparés l'un de l'autre.

La structure de base d'un collecteur de charge est un conducteur (C) fixé à une poignée isolante (I). Nous manipulons le collecteur de charge uniquement par la poignée isolante, sans toucher sa partie conductrice afin d'éviter de le décharger. La partie conductrice du collecteur est placée en contact avec le corps électrisé étudié, afin de recueillir une petite quantité de ses charges. Lors de ce contact, certaines particules électrisées sont transférées entre le corps électrisé et la partie conductrice du collecteur, de telle sorte que celui-ci reçoit des charges de même signe que celles du corps électrisé. La figure 2.15 illustre quelques collecteurs de charge.

⁶[Gra32a], [Gra32b], [Gra36b] et section 4.9 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

⁷Section 7.2 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

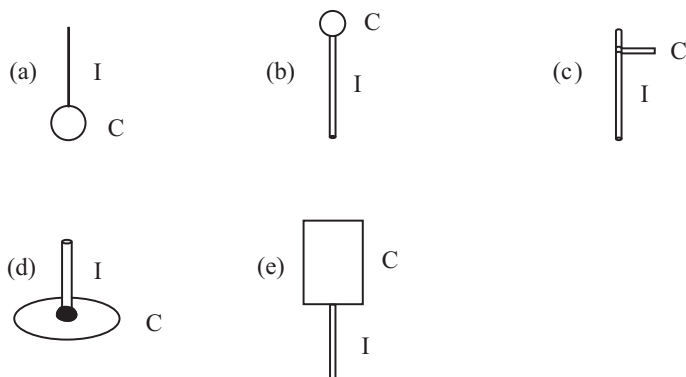


FIG. 2.15 : Collecteurs de charge composés d'une partie conductrice C et d'une poignée isolante I .

La figure 2.15 (a), par exemple, représente un pendule électrique classique. L'isolant peut être un fil de soie, de nylon ou de polyamide. Le conducteur peut être un disque de papier ou de feuille d'aluminium. Ce pendule peut également être constitué d'une petite boule de liège ou de moelle de plante, comme les pendules électriques construits aux XVII^e et XVIII^e siècles. La figure 2.15 (b) peut représenter une boule en feuille d'aluminium reliée à une paille en plastique. Il peut également s'agir d'une sphère métallique reliée à un tube en PVC. La figure 2.15 (c) représente une bande de feuille d'aluminium reliée à une paille en plastique. La figure 2.15 (d) représente un disque en papier ou en carton fin relié à une paille en plastique à l'aide de pâte à modeler. Elle peut également représenter le couvercle circulaire d'une boîte métallique ou d'un moule à pizza fixé en son centre à angle droit à une poignée en PVC, en acrylique ou en plastique dur. La figure 2.15 (e) peut représenter l'électroscope simple utilisé dans ce livre sans la bande de papier de soie. Il s'agit simplement d'un carton rectangulaire fixé à une paille en plastique.

Le modèle de la figure 2.15 (d) a été inventé par Charles Augustin de Coulomb en 1787, figure 2.16. Il est aujourd'hui connu sous le nom de « plan de preuve ».⁸

Le plan de preuve est un disque conducteur fixé par son centre à une poignée isolante. Coulomb l'utilisait pour déterminer la répartition de la charge sur les surfaces de deux ou trois conducteurs chargés par contact. La quantité de charge collectée par le plan de preuve est proportionnelle à la densité locale de charge à la surface. Le modèle utilisé ici est un disque en carton fin de 3 cm de diamètre. Une feuille d'aluminium peut être placée sur l'une de ses faces, mais cela n'est pas indispensable. Découpez un morceau de paille en plastique de 5 cm de long. Il sera fixé à angle droit au centre du disque, comme s'il s'agissait de l'axe de symétrie. L'une des extrémités de la paille peut être fixée au centre du disque à l'aide de pâte à modeler, figure 2.17. Lorsque nous manipulons le plan de preuve, nous devons toucher uniquement la paille, mais pas la pâte à modeler ni le disque.

⁸[Hei99, p. 495].

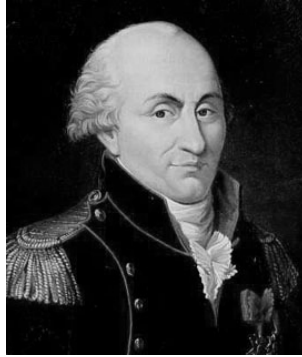


FIG. 2.16 : Charles-Augustin de Coulomb (1736–1806).

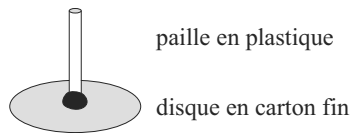


FIG. 2.17 : Plan de preuve de Coulomb. Il s'agit également d'un collecteur de charge, mais il sera appelé « plan de preuve » pour plus de clarté lors de la description des expériences suivantes.

2.7 Testeur de circuit

Pour construire un testeur de circuit, utilisez trois morceaux de fil de cuivre isolé, non isolés à leurs extrémités, figure 2.18 (a), une nouvelle pile alcaline de grande taille, de taille D , qui génère une différence de potentiel de 1,5 volt entre ses pôles, figure 2.18 (b), et une petite ampoule de 1,5 volt avec son support, figure 2.18 (c).

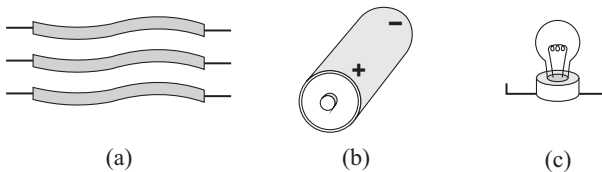


FIG. 2.18 : (a) Trois morceaux de fil de cuivre isolé (dénudez les extrémités). (b) Une pile neuve de taille D . (c) Une ampoule de 1,5 volt et une douille.

Afin de tester le comportement conducteur ou isolant des corps lorsqu'ils sont soumis à une faible différence de potentiel, nous montons le testeur de circuit indiqué dans la figure 2.19.

Il est également utile d'utiliser un support de batterie afin de faciliter les connexions électriques avec les fils. Une extrémité non isolée du premier fil est connectée à la borne négative de la batterie à l'aide d'un ruban adhésif. L'autre extrémité de ce

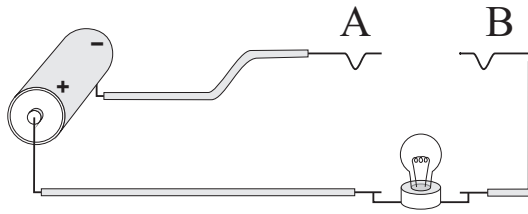


FIG. 2.19 : Testeur de circuit.

premier fil sera formée en crochet, appelé *A*, figure 2.19. Une extrémité non isolée du deuxième fil est connectée à la borne positive de la batterie, l'autre extrémité étant connectée à l'une des bornes de la prise. Une extrémité du troisième fil est connectée à l'autre borne de la prise. L'autre extrémité de ce troisième fil formera un autre crochet, appelé *B*. La distance entre *A* et *B* doit être d'environ 10 cm.

Nous devrions pouvoir placer plusieurs substances entre *A* et *B* afin de tester leurs propriétés conductrices ou isolantes. Lorsque l'ampoule s'allume, le corps sera classé comme conducteur. Lorsque l'ampoule ne s'allume pas, la substance sera classée comme isolante. Ces expériences sont présentées dans la section 3.2.

Chapitre 3

Conducteurs et isolants

La distinction entre conducteurs et isolants est l'un des aspects les plus importants de toute la science de l'électricité. Il est essentiel de tester les corps pour savoir s'ils se comportent comme des conducteurs ou des isolants. Ce test doit être effectué avant de commencer toute expérience. L'électroscope est l'appareil indispensable pour effectuer cette classification.

3.1 Classification des substances en conducteurs ou isolants à l'aide de l'électroscope

Expérience 3.1 — *Chargement d'un électroscope par contact avec un corps électrisé*

Frottez vigoureusement une paille en plastique ou une règle en acrylique dans des cheveux ou avec un morceau de papier. Raclez la paille frottée sur le bord supérieur de l'électroscope. Répétez cette procédure plusieurs fois. Une fois la paille frottée retirée, la bande se détache de l'électroscope, indiquant qu'elle a été électrisée par cette procédure, figure 3.1. L'électroscope s'électrise avec une charge de même signe que celle de la paille frottée.¹

Définition 3.1

Nous disons que l'électroscope « a acquis une charge électrique grâce au contact avec une paille préalablement chargée », qu'il est « chargé par contact » ou « électrisé par contact ». Ce processus est appelé « charge par contact », « transfert de charge par contact » ou « électrisation par contact ».

Expérience 3.2 — *Décharger un électroscope en le touchant avec la main*

Déplacez le doigt près du bord supérieur de l'électroscope chargé et touchez le carton. La bande tombe immédiatement et reste collée au rectangle. Lorsque vous

¹Expérience 6.5 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

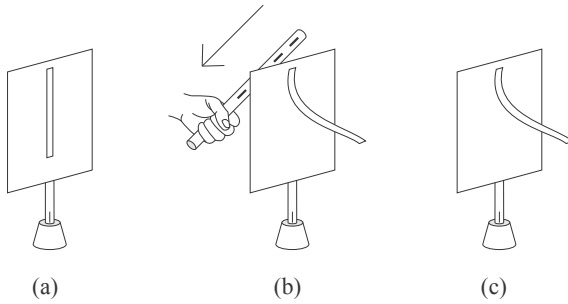


FIG. 3.1 : (a) Électroscope avec sa bande dirigée vers le bas. (b) Raclez le bord supérieur du rectangle avec une paille frottée. (c) Lorsque la paille est retirée, la bande se détache de l'électroscope.

retirez votre doigt, la bande reste verticale, figure 3.2.

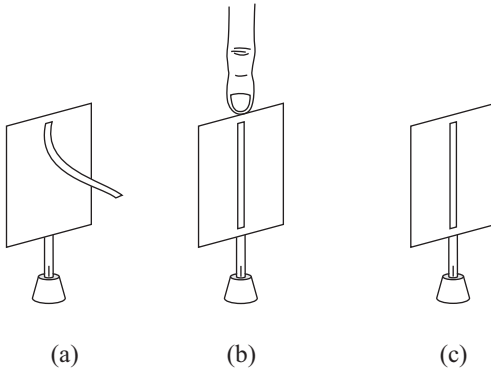


FIG. 3.2 : Décharger un électroscope en le touchant. (a) Un électroscope initialement chargé. (b) Lorsque le doigt touche le bord supérieur du carton, la bande tombe. (c) La bande reste verticale après que le doigt a été retiré.

L'électroscope a été déchargé par ce processus, qui porte un nom particulier :

Définition 3.2

Nous disons que l'électroscope chargé a « perdu sa charge électrique par contact » avec le doigt, ou qu'il a été « déchargé par contact », « déchargé électriquement » ou, simplement, « déchargé ». Ce processus est appelé « décharge par contact », « mise à la terre » ou « mise à la masse ». Il est également appelé « mise à la terre électrique », « mise à la masse électrique », « mettre à la terre » ou « mettre à la masse ». L'origine de ces noms vient du fait que le corps chargé est déchargé par le corps humain, qui est normalement en contact électrique avec le sol.

Au lieu de dessiner le doigt, il est courant d'utiliser un symbole pour représenter

un contact conducteur entre la terre et le système analysé, comme indiqué dans la figure 3.3 (b).

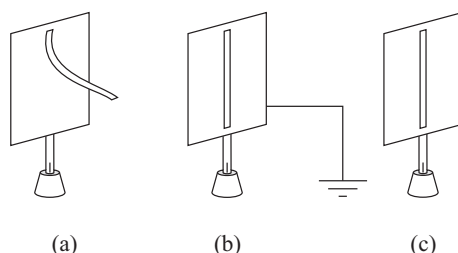


FIG. 3.3 : Symbole représentant la mise à la terre. Il remplace le doigt de la figure 3.2.

Expérience 3.3 — Toucher un électroscope chargé avec une paille en plastique neutre

Nous présentons ici l'expérience la plus importante qui peut être réalisée avec un électroscope chargé. Tenez une extrémité d'un corps avec la main et touchez le bord supérieur de l'électroscope chargé avec l'autre extrémité du corps. La figure 3.4 montre que rien ne se passe avec l'électroscope lorsqu'une paille en plastique neutre touche le carton. Autrement dit, l'électroscope reste électrisé après que la paille a été retirée.

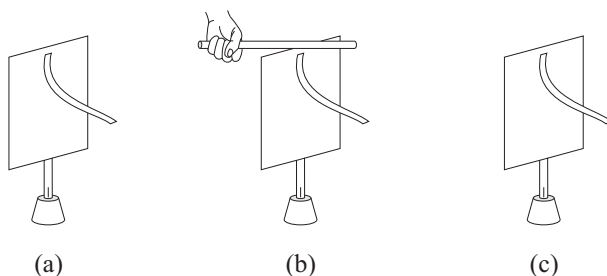


FIG. 3.4 : (a) Un électroscope initialement chargé. (b) Tenez une extrémité d'une paille en plastique neutre avec la main et touchez le bord de l'électroscope avec l'autre extrémité de la paille. Rien ne se passe au niveau de la bande. (c) Lorsque la paille est retirée, la bande reste relevée.

Un électroscope électrisé ne se décharge pas lorsque le carton est touché avec une paille en plastique neutre tenue à la main.

Expérience 3.4 — Toucher un électroscope chargé avec un fil métallique

La figure 3.5 montre ce qui se passe lorsqu'on touche un électroscope chargé avec une brochette en bois ou un fil métallique tenu à la main. La bande relevée retombe immédiatement et reste verticale après que la brochette a été retirée.

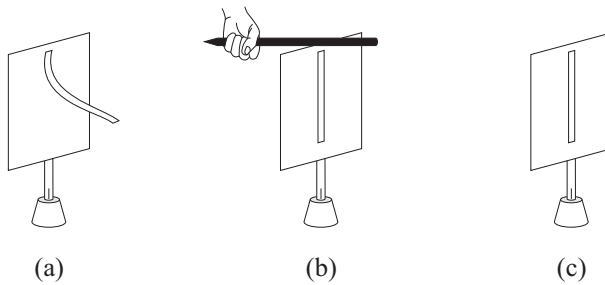


FIG. 3.5 : (a) Un électroscope initialement chargé. (b) Tenez une extrémité d'une brochette en bois avec la main et touchez le bord supérieur de l'électroscope avec l'autre extrémité de la brochette. La bande tombe immédiatement. (c) Lorsque la brochette est retirée, la bande reste en bas.

Un électroscope électrisé se décharge lorsqu'un morceau de bois ou de métal tenu à la main touche le carton. Utilisez du bois brut pour cette expérience. Autrement dit, le morceau de bois ne doit être ni peint ni verni. Les peintures et les vernis peuvent agir comme des isolants, ce qui pourrait avoir une incidence sur le résultat de l'expérience.

L'électroscope se décharge immédiatement lorsqu'un fil métallique tenu à la main touche le carton. Il en va de même pour la plupart des brochettes en bois tenues à la main. Cependant, selon le type de bois, on peut observer une décharge rapide qui n'est pas instantanée, mais qui prend quelques secondes pour décharger l'électroscope.

Observez à nouveau ici la décharge de l'électroscope électrisé comme dans l'expérience 3.2, figure 3.2. Cette fois, la décharge s'est produite à travers la brochette en bois ou le fil métallique.

3.1.1 Définition des termes « conducteur » et « isolant » lorsqu'une haute tension est appliquée entre les extrémités du corps

L'électroscope permet de distinguer deux types de corps dans la nature, à savoir les « conducteurs » et les « isolants ». Nous présentons ici les définitions fondamentales liées aux expériences habituelles en électrostatique :

Définition 3.3

Les substances qui déchargent un électroscope électrisé simplement en le touchant, lorsqu'elles sont tenues dans la main, comme dans l'expérience 3.4, sont appelées « conducteurs d'électricité », « conducteurs électriques » ou simplement « conducteurs ». Les substances qui ne déchargent pas l'électroscope, comme dans l'expérience 3.3, sont appelées « isolants », « non-conducteurs » ou « diélectriques ».

3.1.2 Corps qui se comportent comme des conducteurs ou des isolants dans les expériences habituelles d'électrostatique

En effectuant des procédures similaires aux expériences 3.3 et 3.4 avec plusieurs substances, nous obtenons les résultats suivants :²

- **Conducteurs pour les expériences habituelles d'électrostatique :**

Air humide, corps humain, tous les métaux, papier, carton fin, feuille d'aluminium, papier de soie, carton, bois, coton, morceau de craie, nombreux types de verre à température ambiante, porcelaine, mur, tableau noir, liège, farine de blé, farine de maïs, fil acrylique, sel, sucre, sciure de bois, cuir, terre ou argile, brique, certains types de caoutchouc, savon, glace, etc.

- **Principaux isolants pour les expériences habituelles d'électrostatique :**

Air sec, résines naturelles comme l'ambre et résines synthétiques comme les plastiques en général.

Le nombre de substances conductrices s'avère beaucoup plus important que le nombre de substances isolantes. Ces deux listes montrent que la plupart des substances sont des conducteurs, très peu sont des isolants. Certains conducteurs sont très efficaces, déchargeant l'électroscope presque instantanément, comme c'est le cas du corps humain, des métaux, du coton ou du papier. Bien que le bois soit un conducteur, il ne conduit pas aussi bien que le corps humain. Cela est démontré par le temps plus long nécessaire pour décharger l'électroscope lorsqu'une brochette en bois touche le carton, par rapport au temps très court nécessaire pour le décharger lorsqu'un doigt ou un morceau de métal tenu dans la main touche le carton.

Liste de certaines substances isolantes : air sec, soie (fil ou tissu), résines naturelles (ambre, copal, gomme laque), ainsi que les résines synthétiques (matières plastiques en général, PVC, nylon ou polyamide, polyester, acrylique, polystyrène, etc.)

Les plastiques ont été une grande invention du XX^e siècle. La première résine synthétique, la bakélite, a été créée par Leo Hendrik Baekeland (1863–1944). Elle a été présentée à l'American Chemical Society en 1909. Il est généralement considéré comme le père de l'industrie chimique. Ces résines synthétiques ont reçu le nom générique de « plastique » en raison du fait qu'elles étaient malléables et pouvaient être moulées en objets solides de n'importe quelle forme souhaitée. Au-delà de ces substances, quelques autres matériaux se comportent comme des isolants : le verre chauffé, la laine, un seul cheveu humain, une barre de chocolat, le café moulu, la cire de paraffine et d'autres types de caoutchouc (qui sont différents des types de caoutchouc conducteurs).

Ces deux listes ne doivent pas être considérées comme exhaustives. Chacun doit construire son propre électroscope et tester le comportement de différents matériaux. Il convient d'être prudent avec cette distinction, car de nombreux facteurs peuvent influencer le comportement conducteur ou isolant d'une substance. Parmi ces facteurs, on peut citer la composition chimique du corps, les impuretés présentes à sa surface, son processus de fabrication, l'âge du matériau, etc.

² Chapitre 6 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

Nous ne présentons ici qu'un seul exemple. Un tube en PVC se comporte normalement comme un bon isolant, car il ne décharge pas un électroscope électrisé. Il y a quelques années, nous avons construit un générateur électrostatique, le compte-gouttes de Kelvin, en utilisant des tubes en PVC comme isolants.³ Afin de construire un dispositif fonctionnel, nous avons dû fabriquer trois instruments différents. Nous avons découvert que l'un des premiers générateurs, qui ne fonctionnait pas correctement, présentait un problème au niveau du tube en PVC utilisé. Bien que nous l'ayons utilisé comme isolant, nous avons découvert que ce tube particulier se comportait comme un conducteur. Il ne permettait donc pas l'accumulation de charges dans le générateur. Nous n'avons pas cherché à comprendre pourquoi ce tube en PVC présentait ce comportement anormal. En remplaçant ce tube par un autre tube en PVC qui avait déjà été testé et s'était révélé être un bon isolant, nous avons finalement réussi l'expérience. Il était désormais possible de produire de bonnes étincelles avec cet appareil.

Expérience 3.5 – Toucher un électroscope chargé avec de l'eau

Utilisez une procédure similaire pour déterminer quels liquides sont conducteurs ou isolants. Utilisez un récipient conducteur qui sera rempli de différents liquides. Afin de savoir si le récipient est conducteur ou isolant, chargez un électroscope et touchez le récipient avec son carton fin tout en le tenant dans votre main. Supposons que l'électroscope se décharge après ce contact. Cette décharge signifie que le récipient est réellement conducteur. Les récipients en métal, en bois ou en verre à température ambiante sont des exemples de récipients appropriés. Vous pouvez alors poursuivre l'expérience.

Remplissez complètement le récipient avec le liquide à tester. La figure 3.6 illustre ce qui se passe avec un liquide conducteur comme l'eau du robinet.

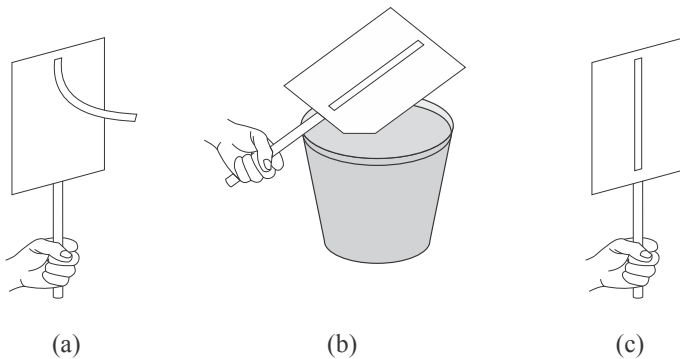


FIG. 3.6 : (a) Un électroscope chargé. (b) Nous plongeons un bord de l'électroscope dans l'eau. Sa bande descend. (c) Lorsque l'électroscope ressort de l'eau, la bande reste en bas.

La figure 3.6 (a) illustre un électroscope chargé. Tenez-le uniquement par sa paille

³[Cam06], [CA08] et section 7.12 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

en plastique afin d'éviter de toucher le carton fin ou la bande surélevée. Dans (b), nous plongeons un bord de l'électroscope dans l'eau. Le carton ne doit pas toucher le récipient, seulement l'eau. Observez que la bande descend. (c) Lorsque l'électroscope sort de l'eau, la bande reste abaissée.

L'électroscope a été déchargé par l'eau.

Expérience 3.6 — Toucher un électroscope chargé avec de l'huile végétale

La figure 3.7 illustre ce qui se passe dans le cas d'un liquide isolant comme l'huile végétale de cuisine. La figure 3.7 (a) montre un électroscope chargé. Nous plongeons ensuite un bord du carton dans le liquide. Le carton ne doit pas toucher le récipient, seulement l'huile. Observez que la bande reste relevée, comme dans la figure 3.7 (b). Lorsque l'électroscope sort du liquide, sa bande reste relevée, comme dans (c).

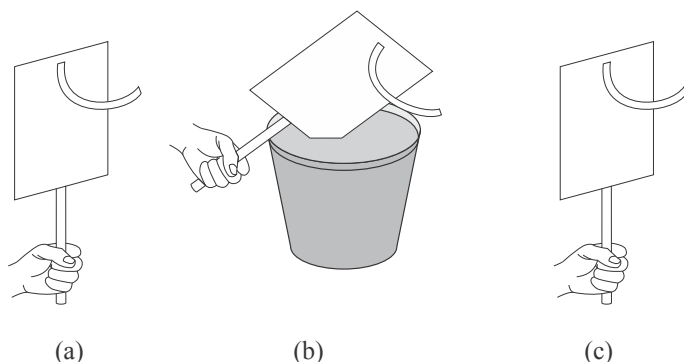


FIG. 3.7 : (a) Un électroscope chargé. (b) Nous plongeons un bord du carton dans un liquide isolant. La bande reste relevée. (c) Lorsque l'électroscope sort du liquide, la bande reste relevée.

L'électroscope chargé n'a pas été déchargé à l'aide d'huile végétale.

En réalisant des procédures telles que les expériences 3.5 et 3.6, nous obtenons les résultats suivants :⁴

- **Liquides conducteurs pour les expériences habituelles d'électrostatique :** Eau douce, pluie, eau du robinet, peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), eau déionisée, eau distillée, eau de Javel (hypochlorite de sodium, $NaClO$), solution saline, alcool, shampoing, kérosène, lait, boissons gazeuses, détergent, liqueur de canne à sucre, vodka, détergent, sauce soja, vinaigre, savon liquide, miel, colle liquide, assouplissant ou après-shampoing, peinture émail, peinture acrylique, huile moteur synthétique ou huile moteur, etc.
- **Liquides isolants pour les expériences habituelles d'électrostatique :** Paraffine fondue et la plupart des types d'huile.

⁴Chapitre 6 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

Autrement dit, presque tous les liquides de la vie quotidienne se comportent comme des conducteurs. Liste de certains liquides isolants : les huiles en général (huiles végétales de cuisson comme l'huile de soja ou de colza, l'huile d'olive, l'huile pour machines, l'huile minérale, l'huile de peroba utilisée comme cire pour meubles, etc.). L'exception à cette liste est l'huile moteur synthétique qui se comporte comme un conducteur dans les expériences habituelles d'électrostatique.

La même procédure utilisée pour tester quels liquides sont conducteurs ou isolants peut également être utilisée pour tester la conductivité des farines. Autrement dit, un récipient conducteur est rempli de la farine à tester. Nous plongeons un bord de l'électroscope chargé dans la farine, en observant si la bande descend ou reste relevée. Évitez de toucher le récipient avec le carton de l'électroscope.

Expérience 3.7 – Corps électrisé attirant un mince filet d'eau

Cette expérience illustre l'effet produit par l'ambre, le plastique ou l'acrylique frottés lorsqu'ils sont approchés de liquides. La paille en plastique ou la règle en acrylique doivent seulement être approchées du liquide, sans le toucher, que la paille (ou la règle) soit neutre ou ait été frottée auparavant.

Ouvrez le robinet de manière à obtenir un mince filet d'eau qui coule régulièrement, figure 3.8 (a). Approchez une paille en plastique neutre du filet : rien ne se passe, figure 3.8 (b).

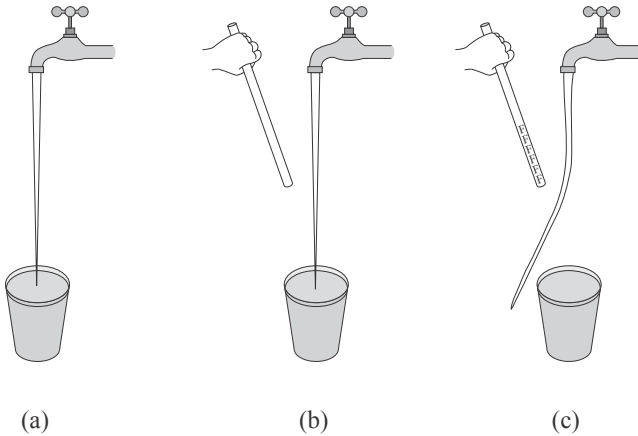


FIG. 3.8 : (a) L'eau s'écoule sans problème. (b) Rien ne se passe lorsqu'une paille en plastique neutre est approchée du filet. (c) Une paille frottée attire le filet.

Frottez une autre paille et approchez-la du filet d'eau. Cette fois, le filet se courbe visiblement vers la paille frottée, figure 3.8 (c)! Cet effet est plus facilement observable lorsque la paille frottée est approchée de la partie supérieure du filet, où la vitesse de l'eau est plus faible. Parfois, l'attraction est si intense que le filet touche la paille. L'expérience fonctionne également avec de l'eau qui goutte. L'effet est plus visible lorsque la paille frottée est proche des gouttes plus lentes.

Un phénomène analogue se produit lorsqu'un plastique frotté s'approche d'un filet de lait, de détergent, d'alcool, de kérosène, de shampoing, de solution saline ou de presque tous les liquides classés comme conducteurs dans la section 3.1. Autrement dit, les filets de ces liquides sont clairement attirés par le plastique frotté. Ils ne sont pas attirés par une paille neutre.

Expérience 3.8 — Corps électrisé attirant un mince filet d'huile végétale

Répétez l'expérience 3.7 pour attirer un liquide isolant tel que de l'huile de cuisine. Supposons qu'un mince filet d'huile s'écoule régulièrement d'un verre ou d'une boîte, figure 3.9 (a). Approchez une paille en plastique neutre du filet et rien ne se passe, figure 3.9 (b). Frottez une autre paille et approchez-la du filet. Cette fois, le filet se courbe légèrement vers la paille frottée, figure 3.9 (c).

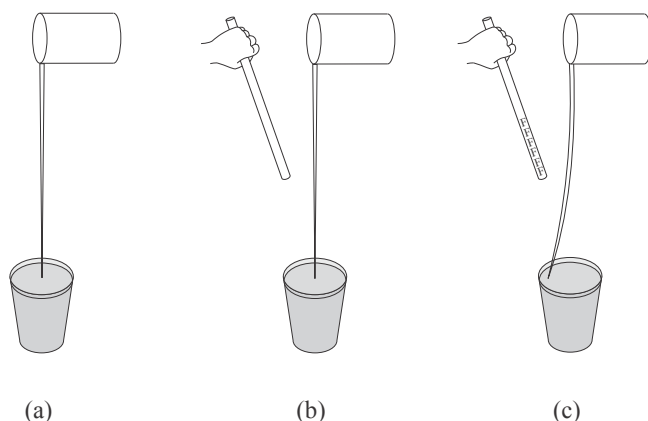


FIG. 3.9 : (a) L'huile s'écoule sans problème. (b) Rien ne se passe lorsqu'une paille en plastique neutre est approchée du filet. (c) Une paille frottée attire faiblement le filet.

Dans le cas de l'huile, l'effet, à savoir la courbure du filet, n'est pas aussi prononcé que dans le cas des autres liquides conducteurs de l'expérience 3.7, comme l'eau de la figure 3.8.

Les expériences 3.7 et 3.8 montrent que l'attraction exercée par un corps électrisé sur un conducteur est beaucoup plus importante que son attraction sur un isolant.⁵ Supposons deux substances, un conducteur et un isolant, de même taille, poids et forme. Elles sont placées à la même distance d'un corps électrisé. Des expériences montrent que le conducteur subit une force d'attraction plus importante que l'isolant, les deux forces étant exercées par le même corps électrisé. On peut tirer de ces expériences un principe pratique ou une règle empirique, à savoir : si un corps électrisé attire visiblement des substances légères, ces substances se comporteront comme des

⁵Section 7.7 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

conducteurs dans les expériences habituelles d'électrostatique. Autrement dit, lorsqu'elles sont tenues dans la main, ces substances déchargent un électroscope lorsqu'elles touchent le carton de l'électroscope.

L'effet inverse se produit également. Autrement dit, les substances qui déchargent un électroscope sont fortement attirées par un corps électrisé situé à proximité. Les isolants, en revanche, ne déchargent pas un électroscope et ne subissent qu'une faible force d'attraction exercée par un corps électrisé situé à proximité.

3.2 Classification des substances en conducteurs ou isolants à l'aide du testeur de circuit

Dans le volume 1 de cet ouvrage, nous avons montré que la différence de potentiel agissant entre les extrémités d'un corps est un facteur important qui influence son comportement conducteur ou isolant.⁶ Un corps qui se comporte comme un isolant lorsque ses extrémités sont soumises à une faible différence de potentiel électrique (généralement jusqu'à quelques dizaines de volts) peut se comporter comme un conducteur lorsque cette différence de potentiel dépasse une certaine limite. Dans les expériences habituelles d'électrostatique, nous traitons des différences de potentiel allant généralement de 1 000 volts à 10 000 volts (c'est-à-dire entre 10^3 V et 10^4 V). Dans ces conditions, la plupart des substances solides et liquides se comportent comme des conducteurs. En revanche, pour des différences de potentiel faibles, jusqu'à quelques dizaines de volts, la plupart des substances se comportent comme des isolants. Les métaux font exception à cette règle, car ils se comportent comme d'excellents conducteurs pour ces faibles et fortes différences de potentiel. Les résines naturelles et synthétiques, comme l'ambre et les plastiques en général, font également exception à cette règle. Elles se comportent comme de bons isolants pour ces faibles et fortes différences de potentiel.

Cette section décrit quelques expériences utilisant le testeur de circuit de la figure 2.19. Nous traiterons des faibles différences de potentiel. Nous établirons une nouvelle définition des conducteurs et des isolants adaptée à ces conditions.

Expérience 3.9 — Fermer le testeur de circuit avec un fil métallique

Considérons un quatrième fil de cuivre, non isolé aux extrémités. Une extrémité de ce quatrième fil est connectée au point *A* de la figure 2.19 et l'autre extrémité est connectée au point *B*. L'ampoule devrait s'allumer, figure 3.10. Cela indique que les connexions ou contacts électriques sont correctement établis. De plus, cela indique également qu'un courant électrique circule dans les fils et l'ampoule. Comme l'ampoule s'allume, le fil de cuivre se comporte comme un conducteur d'électricité lorsqu'il est soumis à une différence de potentiel de 1,5 volt = 1,5 V.

Si l'ampoule reste allumée pendant plusieurs minutes, la batterie s'affaiblit. Cela se traduit par une diminution de l'intensité lumineuse, qui finit par atteindre zéro. Lorsque cela se produit, la batterie est déchargée. Pour éviter qu'elle ne se décharge,

⁶Section 6.6 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

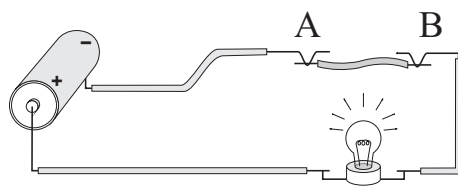


FIG. 3.10 : Lorsque les extrémités non isolées d'un fil de cuivre sont connectées aux extrémités *A* et *B*, l'ampoule s'allume.

la meilleure solution consiste à ouvrir le contact (c'est-à-dire à retirer le quatrième fil entre *A* et *B*) dès que l'ampoule s'allume. Vous pouvez ensuite utiliser la même batterie pour tester d'autres substances.

Expérience 3.10 — Fermer le testeur de circuit avec une paille en plastique ou une brochette en bois

Reliez les points *A* et *B* à l'aide d'une paille en plastique. Lorsque nous faisons cela, l'ampoule ne s'allume pas. Cela indique qu'aucun courant électrique ne circule dans le circuit, figure 3.11 (a). L'ampoule reste également éteinte lorsque *A* et *B* sont reliés par une brochette en bois, figure 3.11 (b).

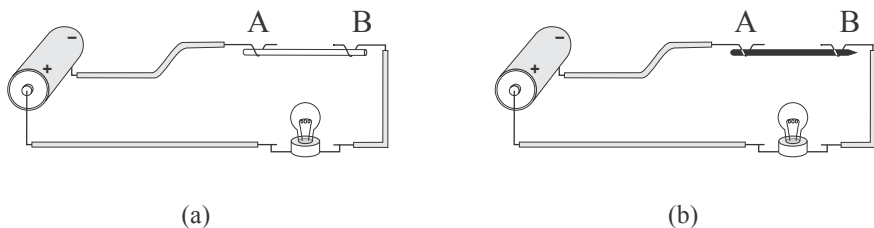


FIG. 3.11 : (a) L'ampoule ne s'allume pas lorsque *A* et *B* sont reliés par une paille en plastique. (b) L'ampoule reste également éteinte lorsque *A* et *B* sont reliés par une brochette en bois.

Comme l'ampoule ne s'allume pas, une paille en plastique ou une brochette en bois agissent comme des isolants électriques lorsqu'ils sont soumis à une différence de potentiel de 1,5 V.

Expérience 3.11 — Fermer le testeur de circuit avec de l'eau

La meilleure façon de tester les liquides est d'utiliser un récipient isolant (comme un gobelet en plastique, par exemple). Au départ, celui-ci doit être vide. Afin de vérifier s'il s'agit bien d'un isolant, reliez *A* et *B* à ce récipient vide. À partir de là, supposons que l'ampoule ne s'allume pas, ce qui indique que ce récipient se comporte comme un isolant lorsqu'il est soumis à une différence de potentiel de 1,5 V.

Le gobelet en plastique est ensuite rempli d'eau fraîche du robinet ou d'eau de pluie. Les bornes *A* et *B* sont alors immergées dans l'eau. L'ampoule ne s'allume pas,

figure 3.12. Ce fait indique que l'eau fraîche se comporte comme un isolant lorsqu'elle est soumise à une différence de potentiel de 1,5 V.

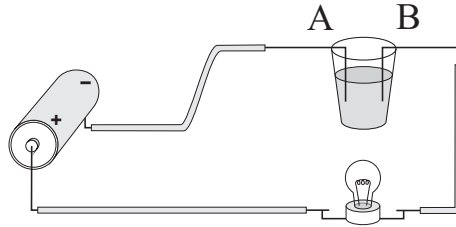


FIG. 3.12 : L'ampoule ne s'allume pas lorsque *A* et *B* sont reliés à de l'eau douce.

3.2.1 Définition des termes « conducteur » et « isolant » lorsqu'une faible différence de potentiel est appliquée entre les extrémités du corps

En suivant les procédures des expériences 3.9 à 3.11 avec plusieurs substances, établissez une nouvelle classification des substances basée sur une autre définition adaptée aux basses tensions.

Définition 3.4

Si l'ampoule de la figure 2.19 s'allume lorsqu'une certaine substance relie les points *A* et *B*, comme dans la figure 3.10, cette substance est appelée un « conducteur ». Si l'ampoule ne s'allume pas, comme indiqué dans la figure 3.11, la substance est appelée un « isolant ».

Selon cette définition, un fil de cuivre est un conducteur lorsque ses extrémités sont soumises à une différence de potentiel de 1,5 V. Une paille en plastique, une brochette en bois et de l'eau douce, en revanche, sont des isolants pour cette différence de potentiel. Comme l'a observé Gaspar, le graphite, l'eau salée et un citron se comportent également comme des isolants pour cette différence de potentiel,⁷ bien que de nombreux manuels indiquent à tort que l'ampoule s'allumerait lorsque les points *A* et *B* de la figure 2.18 seraient reliés par ces substances.

3.2.2 Corps qui se comportent comme des conducteurs ou des isolants dans les expériences habituelles à courant constant

Nous effectuons plusieurs tests analogues aux expériences 3.9 à 3.11. Le résultat final est le suivant :

⁷[Gas03, pp. 252–256].

- **Substances qui se comportent comme des conducteurs lorsque leurs extrémités sont soumises à une différence de potentiel de 1,5 V :**

Tous les métaux.

- **Substances qui se comportent comme des isolants lorsque leurs extrémités sont soumises à une différence de potentiel de 1,5 V :**

Air sec, air humide, ambre, plastique, soie, bois, verre chauffé, verre à température ambiante, nylon ou polyamide synthétique, coton, PVC, polyester, laine, cheveux humains, tube acrylique, tissu acrylique, polystyrène, barre chocolatée, café moulu, papier, carton fin, papier de soie, morceau de craie, porcelaine, eau douce, eau salée, limonade, alcool, shampoing, kérosène, lait, boissons gazeuses, détergent, huile végétale de cuisine, mur, tableau noir, liège, farine de blé, farine de maïs, fil acrylique, sel, sucre, sciure de bois, terre ou argile, brique, caoutchouc, etc.

Plusieurs variantes de ces expériences peuvent être réalisées. Lorsque nous ne disposons pas de douilles d'ampoule, les fils peuvent être soudés directement sur les bornes des ampoules. Autrement dit, l'extrémité non isolée d'un fil est connectée à la coque latérale de la vis de l'ampoule, tandis que l'extrémité non isolée d'un autre fil est soudée à l'extrémité inférieure de la base de la vis de l'ampoule. Ces deux fils peuvent également être simplement fixés à la coque et à l'extrémité de la vis à l'aide de ruban adhésif ou à la main. Les extrémités non isolées des fils peuvent également être mises directement en contact avec les bornes positive et négative de la pile, en les fixant à l'aide de ruban adhésif ou à la main. Si un support de pile est disponible, il est généralement équipé de fils dont l'une des extrémités est directement connectée aux bornes de la pile, tandis que leurs extrémités libres peuvent être connectées à d'autres fils ou à la douille d'une ampoule. Deux piles de 1,5 V peuvent également être connectées en série, ce qui donne une différence de potentiel de 3 V entre leurs extrémités libres.

Il est important de noter qu'il existe plusieurs substances qui se comportent comme des conducteurs selon la définition 3.3, alors qu'elles se comportent comme des isolants selon la définition 3.4. Exemples : l'eau douce, une brochette en bois, le papier, de nombreux types de verre à température ambiante, etc. Ces substances déchargent un électroscope électrisé lorsqu'il existe une différence de potentiel comprise entre 1 000 V et 10 000 V entre l'électroscope et la terre. Elles se comportent donc comme des conducteurs pour ces tensions élevées. Cependant, elles ne permettent pas le passage d'un courant électrique d'une intensité suffisante pour allumer la lampe (c'est-à-dire qu'elles ne permettent pas le passage d'une quantité suffisante de particules électrisées à travers elles) lorsque leurs extrémités sont soumises à une faible tension pouvant atteindre quelques dizaines de volts. Ces mêmes substances se comportent donc comme des isolants pour ces faibles tensions.

Comme mentionné dans le volume 1 de cet ouvrage, en raison de ce fait, il pourrait être approprié de modifier la terminologie. Normalement, nous disons qu'un certain corps A «est» un conducteur, tandis qu'un autre corps B «est» un isolant. Cependant, d'après ce que nous venons de voir, il serait plus correct de dire que dans un certain ensemble de conditions, le corps A «se comporte comme» un conducteur, tandis

que dans un autre ensemble de conditions, il « se comporte comme » un isolant. La même terminologie serait valable pour le corps B . Mais cette nouvelle terminologie rendrait toutes les phrases très longues et compliquées. C'est pourquoi nous conserverons la procédure habituelle consistant à dire que les corps « sont » des conducteurs ou des isolants. Mais il doit être clair pour tout le monde qu'il s'agit de concepts relatifs. Le comportement des corps dépend non seulement de leurs propriétés intrinsèques, mais aussi des conditions externes auxquelles ils sont soumis.

3.3 Facteurs influençant les propriétés conductrices et isolantes d'une substance

3.3.1 Nature ou composition chimique de la substance

Les expériences de la section 3.1 montrent que les corps peuvent être divisés en deux groupes appelés conducteurs et isolants. En électrostatique, une différence de potentiel élevée peut être appliquée aux extrémités d'un corps. Ils peuvent alors être classés à l'aide d'un électroscope chargé. Touchez une extrémité du corps au carton de l'électroscope et connectez l'autre extrémité du corps à la main ou à la terre. Les corps qui déchargent l'électroscope sont appelés conducteurs. Un fil métallique en est un exemple. Les corps qui ne déchargent pas l'électroscope sont appelés isolants. Une paille en plastique en est un exemple.

Ces expériences montrent que le principal aspect influençant cette classification est la nature du corps, c'est-à-dire sa composition chimique et sa structure interne. La plupart des corps se comportent en électrostatique comme des conducteurs. Exemples : métaux, eau, papier, corps humain, bois, nombreux types de verre à température ambiante, plusieurs types de caoutchouc, etc. Seules quelques substances se comportent comme des isolants. Exemples : air sec, soie, huile végétale, ambre et autres résines naturelles, ainsi que les plastiques en général et autres résines synthétiques.

Les expériences de la section 3.2 montrent qu'une autre classification des conducteurs et des isolants est nécessaire lorsqu'une faible différence de potentiel est appliquée entre les extrémités d'un corps. Cette nouvelle classification peut être obtenue à l'aide du testeur de circuit de la figure 2.19. Commencez avec une pile neuve et connectez les extrémités du corps entre les points A et B du testeur de circuit. Lorsque l'ampoule s'allume, on dit que le corps est un conducteur. Lorsque l'ampoule ne s'allume pas, on dit que le corps se comporte comme un isolant.

Ces expériences montrent également, dans les expériences habituelles où un courant constant peut circuler dans le circuit, que le principal aspect influençant la classification des corps est leur nature ou leur composition chimique. Pour les faibles différences de potentiel (jusqu'à quelques centaines de volts), tous les métaux se comportent comme des conducteurs. La plupart des autres substances se comportent comme des isolants. Exemples : l'eau, le papier, le corps humain, le bois, la plupart des verres à température ambiante, plusieurs types de caoutchouc, l'air sec et humide, la soie, l'huile végétale, l'ambre et d'autres résines naturelles, ainsi que les plastiques en général et d'autres résines synthétiques.

3.3.2 Différence potentielle entre les extrémités du corps

Au-delà des propriétés internes ou intrinsèques d'un corps, les sections 3.1 et 3.2 ont démontré qu'une autre propriété fondamentale permettant de classer une substance comme conductrice ou isolante est la différence de potentiel externe appliquée entre les extrémités du corps. Les métaux se comportent comme des conducteurs pour les différences de potentiel faibles et élevées. D'autres substances se comportent comme des isolants pour les différences de potentiel faibles et élevées : l'air sec, la soie, l'huile végétale, l'ambre et d'autres résines naturelles, ainsi que les plastiques en général et d'autres résines synthétiques.

D'autre part, plusieurs substances se comportent comme des conducteurs dans les expériences habituelles d'électrostatique (traitant des différences de potentiel élevées), mais comme des isolants dans les expériences habituelles traitant du flux possible d'un courant électrique constant (traitant des différences de potentiel faibles). Nous énumérons ici certaines de ces substances : l'air humide, l'eau, le papier, le corps humain, le bois, de nombreux types de verre à température ambiante et plusieurs types de caoutchouc. Les sous-sections 3.1.2 et 3.2.2 présentent les classifications appropriées pour chaque cas.

3.3.3 Le temps nécessaire pour décharger un corps électrisé

Expérience 3.12 — *Un électroscope posé sur une table se décharge avec le temps*

Chargez un électroscope comme dans l'expérience 3.1, figure 3.1. C'est-à-dire, raclez son carton avec une paille frottée. Laissez cet électroscope chargé sur une table par temps sec. Observez que la bande reste relevée pendant plusieurs secondes, voire quelques minutes. Cependant, si nous attendons suffisamment longtemps, par exemple une heure, l'électroscope se déchargera complètement.

Ce phénomène implique que la définition 3.3 d'un conducteur et d'un isolant, telle qu'elle est donnée dans la sous-section 3.1.1, dépend du temps d'observation. Pour un intervalle de temps de quelques secondes, l'air sec peut être considéré comme un bon isolant. Pour un intervalle de temps d'une heure, en revanche, l'air sec peut être classé comme un conducteur, car il permet la décharge d'un électroscope.

Cette distinction peut être clarifiée à l'aide de définitions plus précises liées aux procédures expérimentales décrites dans la section 3.1.

Définition 3.5

Dans le cadre de cet ouvrage, les « bons conducteurs » sont les substances qui déchargent un électroscope lorsqu'elles sont mises en contact avec celui-ci pendant moins de 5 secondes. Les « mauvais conducteurs », ou « mauvais isolants », sont les substances qui mettent environ 5 à 20 ou 30 secondes pour décharger l'électroscope. Ces corps sont également appelés « mauvais conducteurs », « mauvais isolants », « conducteurs imparfaits » ou « isolants imparfaits ». Enfin, les « bons isolants » sont les substances qui nécessitent plus de 20 ou 30 secondes pour décharger un électroscope chargé. Dans cet ouvrage, nous désignerons généralement les bons conducteurs par le terme « conducteurs », tandis que les bons isolants seront simplement appelés « isolants ».

3.3.4 La longueur du corps

Les expériences de cette sous-section et celles de la sous-section 3.3.5 ne doivent être réalisées que par temps sec. Dans ce cas, un électroscope, chargé comme dans l'expérience 3.1, figure 3.1, reste électrisé pendant un intervalle de temps d'au moins 30 secondes. En revanche, par temps humide et pluvieux, l'électroscope se décharge rapidement dans l'air ambiant peu après avoir été électrisé (lorsque son carton est raclé avec une paille ou une règle en plastique). Par temps pluvieux, les résultats des expériences de cette sous-section et de la sous-section 3.3.5 ne seront pas très clairs. C'est pourquoi il faut éviter de réaliser ces activités par temps humide.

Cette sous-section examine l'influence de la longueur d'une substance qui entre en contact avec un électroscope chargé en ce qui concerne ses propriétés conductrices ou isolantes.

Expérience 3.13 — Décharger un électroscope en le touchant avec des bandes de papier

Découpez plusieurs bandes de papier (format A4 ou lettre), de 2 cm de large et d'une longueur variant entre 10 cm et 1 m. Vous pouvez obtenir une longueur de 1 m en assemblant les extrémités de bandes plus courtes à l'aide de colle ou de trombones. Chargez un électroscope et placez-le sur une table par temps sec. Tenez une extrémité de la bande de 10 cm avec la main et touchez le bord du carton fin de l'électroscope avec l'autre extrémité.⁸ Observez une décharge rapide de l'électroscope, de 1 à 3 secondes, figure 3.13 (b) et (c). Par conséquent, selon la définition 3.5 de la sous-section 3.3.3, cette bande peut être considérée comme un bon conducteur.

Rechargez l'électroscope et utilisez maintenant une bande de papier de 30 cm × 2 cm. Tenez une extrémité de la bande de papier avec la main tandis que son extrémité libre touche le carton de l'électroscope. Observez facilement l'intervalle de temps requis de 4 à 6 secondes pour décharger l'électroscope. Selon le type de papier, cette bande de papier de 30 cm de long peut être considérée comme un mauvais conducteur.

Cette expérience montre également clairement que la quantité de charge perdue par l'électroscope électrisé augmente avec le temps, voir la sous-section 3.3.3. La seule

⁸Section 6.7 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

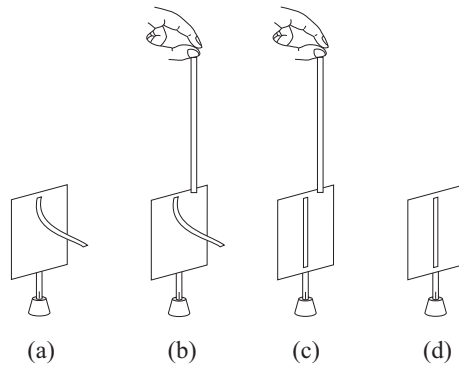


FIG. 3.13 : (a) Un électroscope chargé. (b) et (c) : Une bande de papier tenue à la main décharge rapidement l'électroscope lorsque son extrémité libre touche le carton fin. (d) Le retrait de la bande de papier laisse l'électroscope déchargé.

différence est que dans la situation actuelle, l'électroscope se décharge principalement par la bande de papier et non par l'air ambiant.

L'électroscope est chargé une fois de plus et l'expérience est répétée avec une bande de papier de 1 m de long et 2 cm de large. On observe que l'électroscope reste chargé pendant environ 10 secondes. Lorsque l'air est très sec, cet intervalle de temps de décharge peut augmenter jusqu'à 20 ou 30 secondes, selon le type de papier. D'après la définition 3.5 de la sous-section 3.3.3, nous concluons que cette bande de papier de 1 m de long peut être considérée comme un bon isolant.

Cette expérience montre que la longueur d'une substance a une influence sur son comportement en tant que conducteur ou isolant. En augmentant la longueur d'une substance entre la main et le carton de l'électroscope, nous augmentons l'intervalle de temps nécessaire pour décharger l'électroscope.

Expérience 3.14 — *Décharger un électroscope en le touchant avec des fils à coudre*

L'expérience 3.13 peut être répétée avec plusieurs matériaux. Il existe plusieurs substances intéressantes qui montrent clairement l'influence de la longueur du corps sur l'intervalle de temps nécessaire pour décharger un électroscope : papier, carton, ficelle de coton, fil à coudre, etc. Le tableau 3.1 présente l'intervalle de temps mesuré nécessaire pour décharger un électroscope avec des bandes de papier de 2 cm de large et avec du fil à coudre, lorsque la procédure de l'expérience 3.13 est suivie.

Les valeurs numériques de ce tableau et des autres tableaux présentés dans cet ouvrage doivent être considérées uniquement de manière qualitative. Des valeurs très différentes de celles présentées ici peuvent être obtenues en fonction du degré d'électrisation de l'électroscope, de sa taille, des conditions atmosphériques du jour où l'expérience est réalisée, de la qualité ou de la composition chimique du matériau testé, etc. Ces chiffres indiquent uniquement le comportement qualitatif des facteurs qui influencent les propriétés conductrices ou isolantes d'un corps.

TAB. 3.1 : Intervalles de temps approximatifs nécessaires pour décharger l'électroscope.

Substance \ Longueur	10 cm	30 cm	1 m
bande de papier	1–3 s	4–6 s	10–30 s
fil à coudre	2 s	3 s	6 s

Expérience 3.15 — *Toucher un électroscope chargé avec d'autres substances*

Réalisez une expérience similaire en utilisant une paille en plastique à la place de la bande de papier. Une paille classique mesure 20 cm de long. Coupez-la et reliez les extrémités de ces pailles afin d'obtenir des pailles de différentes longueurs : 10 cm, 30 cm ou 1 m. Tenez une extrémité de cette paille avec la main tandis que son extrémité libre touche le carton d'un électroscope chargé. Observez que l'électroscope reste chargé pendant plus de 20 ou 30 secondes par temps sec. Nous en concluons que les pailles de toutes ces différentes longueurs peuvent être considérées comme de bons isolants. Nous ne percevons pas dans ce cas l'influence de leur longueur sur le temps de décharge, car l'électroscope reste chargé même après avoir touché le carton avec une courte paille en plastique de 10 cm de long.

Le comportement inverse se produit lorsque des bandes de feuille d'aluminium de 2 cm de large touchent le carton d'un électroscope chargé. En effet, celui-ci se décharge presque instantanément pour des bandes d'une longueur comprise entre 10 cm et 1 m. Une bande de feuille d'aluminium peut être considérée comme un bon conducteur dans tous ces cas. Une fois de plus, nous ne percevons pas l'influence de sa longueur sur le temps de décharge. Après tout, même pour une bande de 1 m de long, la décharge de l'électroscope est si rapide qu'elle ne peut être mesurée avec une montre-bracelet ordinaire.

Expérience 3.16 — *Chargement de deux électroscopes reliés par des bandes de papier*

Une expérience similaire utilise deux électroscopes reliés par des bandes ou des fils constitués de différents matériaux, à savoir du papier, du carton, de la feuille d'aluminium, des pailles en plastique, de la ficelle ou du fil à coudre.⁹ Ces matériaux peuvent être fixés aux cartons des électroscopes à l'aide de trombones, figure 3.14.

Reliez les deux électroscopes à l'aide d'une bande de papier de 2 cm de large et 10 cm de long. Les électroscopes sont initialement déchargés. Électrisez une règle en acrylique ou une paille en plastique en la frottant dans des cheveux ou une serviette en papier. Raclez plusieurs fois la paille contre le bord supérieur de l'un des électroscopes jusqu'à ce qu'il soit chargé, c'est-à-dire jusqu'à ce que la bande de papier de soie reste relevée. Essayez de mesurer l'intervalle de temps nécessaire pour charger le deuxième électroscope. Cette mesure n'est pas fiable. En effet, le deuxième électroscope commence à se charger non seulement à la fin de cette procédure, mais aussi pendant l'intervalle de temps où le premier électroscope est raclé pour la première

⁹[FM91, pp. 43–45], [Fersdc, p. 70] et [FR08, p. 18].

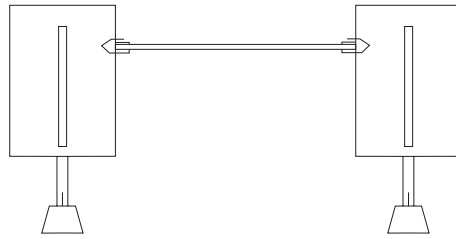


FIG. 3.14 : Deux électroscopes reliés par une bande de papier.

fois. Il est parfois nécessaire de taper plusieurs fois la paille du deuxième électroscope pour libérer sa fine bande de papier de soie, afin qu'elle commence à se soulever.

Expérience 3.17 — *Décharge de deux électroscopes reliés par des bandes de papier*

Une mesure plus fiable de l'intervalle de temps peut être obtenue en utilisant les deux électroscopes de l'expérience 3.16. Pour ce faire, attendez que les deux électroscopes reliés par la bande de papier soient électrisés de manière égale. Touchez le carton supérieur d'un électroscope avec le doigt. Ses bandes de papier de soie tombent immédiatement. Tout en maintenant le doigt sur le premier électroscope, mesurez l'intervalle de temps nécessaire pour décharger le second électroscope. Lorsque les deux électroscopes sont reliés par cette bande de papier de 2 cm de large et 10 cm de long, cet intervalle de temps nécessaire varie entre 2 et 3 s.

Répétez cette expérience avec des bandes de papier de 2 cm de large et de différentes longueurs reliant les électroscopes, avec des longueurs allant de 10 cm à 1 m. La même procédure peut être utilisée lorsque les deux électroscopes sont reliés par des fils à coudre de 10 cm, 30 cm et 1 m de long. Le tableau 3.2 indique un résultat typique d'une expérience comme celle-ci utilisant différents matériaux.

TAB. 3.2 : Intervalles de temps approximatifs nécessaires pour décharger l'un des électroscopes chargés après avoir mis l'autre électroscope à la terre.

Substance \ Longueur	10 cm	30 cm	1 m
bande de papier	2–3 s	5 s	20–25 s
fil à coudre	2 s	4 s	15–20 s

Reliez les deux électroscopes à l'aide de pailles en plastique de 10 cm, 30 cm ou 1 m de long. Électrisez les deux électroscopes de manière égale en raclant des pailles frottées sur leurs cartons. Au début de l'expérience, les bandes de papier de soie doivent être relevées de manière égale par rapport aux deux cartons. Touchez le carton du premier électroscope avec le doigt et observez que la bande de papier de soie retombe immédiatement. Le deuxième électroscope, en revanche, reste électrisé pendant plus de 20 ou 30 secondes par temps sec, quelle que soit la longueur de la paille en plastique reliant les électroscopes.

Reliez les deux électroscopes à l'aide de bandes de feuille d'aluminium de 2 cm de large et de différentes longueurs, à savoir 10 cm, 30 cm ou 1 m. Électrisez le système de manière à ce que les deux bandes de papier de soie soient soulevées de manière égale. Lorsqu'un doigt touche le carton du premier électroscope, sa bande de papier de soie tombe immédiatement. Il en va de même pour la bande de papier de soie du deuxième électroscope, quelle que soit la longueur de la bande de feuille d'aluminium reliant les deux électroscopes.

Dans ces deux derniers exemples, nous ne sommes pas en mesure de détecter l'influence de la longueur du corps reliant les deux électroscopes en ce qui concerne l'intervalle de temps nécessaire pour décharger le deuxième électroscope. Lorsqu'ils sont reliés par une paille en plastique, cet intervalle de temps est très long, quelle que soit la longueur de la paille. Autrement dit, le deuxième électroscope reste chargé après la mise à la terre du premier électroscope. En revanche, lorsqu'ils sont reliés par une bande de feuille d'aluminium, cet intervalle de temps est nul, quelle que soit la longueur de la bande. Autrement dit, les deux électroscopes se déchargent presque instantanément lorsque l'un d'eux est mis à la terre. Dans ce cas, l'intervalle de temps nécessaire pour décharger le deuxième électroscope est si court qu'il ne peut être mesuré avec une simple montre-bracelet, quelle que soit la longueur de la bande de feuille d'aluminium reliant les électroscopes.

Considérons maintenant la situation des expériences précédentes dans lesquelles l'intervalle de temps nécessaire pour décharger le deuxième électroscope variait entre 1 seconde et 2 minutes. Ces expériences ont démontré que plus la longueur du corps reliant les deux électroscopes était grande, plus la décharge du deuxième électroscope était lente après la mise à la terre du premier électroscope.

3.3.5 La section transversale du corps

Cette sous-section examine l'influence de la section transversale d'une substance qui entre en contact avec un électroscope chargé en ce qui concerne ses propriétés conductrices ou isolantes.

Expérience 3.18 — *Décharger un électroscope en le touchant avec des cheveux*

Chargez un électroscope et placez-le sur une table. Tenez une extrémité d'un cheveu humain avec la main et touchez l'autre extrémité du cheveu sur le carton fin de l'électroscope chargé, comme dans la figure 3.13. Observez que l'électroscope reste chargé pendant plusieurs secondes. Cela indique qu'un seul cheveu humain peut être classé comme un bon isolant.

Chargez à nouveau l'électroscope et augmentez le nombre de cheveux tenus dans la main. Touchez simultanément leurs extrémités libres sur le carton de l'électroscope chargé. Observez qu'en augmentant le nombre de cheveux, la décharge devient plus rapide. Par exemple, avec des dizaines de cheveux, l'électroscope se décharge en quelques secondes. Cette quantité de cheveux peut être classée comme un bon conducteur.

Expérience 3.19 — Décharger un électroscope en le touchant avec des bandes de papier

Répétez l'expérience 3.13 en utilisant des corps de longueur fixe, mais en modifiant leur section transversale. Modifiez, par exemple, la largeur des bandes de papier qui entreront en contact avec l'électroscope. Le tableau 3.3 présente les résultats de cette expérience avec des bandes de papier d'une longueur de 1 m et deux largeurs différentes, 0,5 et 2 cm.

TAB. 3.3 : Intervalles approximatifs pour décharger l'électroscope.

Largeur de la bande de papier	0,5 cm	2 cm
Intervalles de temps	50 s	10 s

Expérience 3.20 — Décharger un électroscope en le touchant avec des fils de coton

Répétez l'expérience 3.13 en utilisant des fils ou des ficelles de coton de longueur fixe, mais en modifiant leur section transversale. Tenez une extrémité du fil, touchez l'autre extrémité sur le carton de l'électroscope chargé et mesurez le temps de décharge. Le tableau 3.4 présente les résultats de cette expérience avec un fil à coudre en coton fin et une ficelle de coton plus épais, tous deux d'une longueur de 1 m.

TAB. 3.4 : Intervalles approximatifs pour décharger l'électroscope.

Coton	fil à coudre	ficelle
Intervalles de temps	6 s	6–7 s

Expérience 3.21 — Décharge de deux électroscopes reliés par une bande de papier

Répétez l'expérience 3.16 en reliant les deux électroscopes à l'aide de bandes de papier de même longueur, mais de largeur différente ou de section différente. Le tableau 3.5 compare les intervalles de temps nécessaires pour décharger l'électroscope 2 après que l'électroscope 1 a été mis à la terre en touchant son carton avec le doigt. Toutes les substances de connexion mesuraient 1 m de long.

TAB. 3.5 : Intervalles de temps approximatifs pour décharger l'un des électroscopes lorsque l'autre électroscope est mis à la terre.

Largeur de la bande de papier	0,5 cm	2 cm
Intervalles de temps	60 s	20–25 s

Expérience 3.22 — *Décharge de deux électroscopes à l'aide d'un fil de coton*

Répétez l'expérience 3.16 en reliant les deux électroscopes à l'aide de fils de coton de même longueur, mais de largeurs différentes ou de sections transversales différentes. Le tableau 3.5 compare les intervalles de temps nécessaires pour décharger l'électroscopie 2 après que l'électroscopie 1 a été mis à la terre en touchant son carton avec le doigt. Toutes les substances de connexion mesuraient 1 m de long.

TAB. 3.6 : Intervalles de temps approximatifs pour décharger l'un des électroscopes lorsque l'autre électroscopie est mis à la terre.

Coton	fil à coudre	ficelle
Intervalles de temps	15–20 s	6–7 s

Expérience 3.23 — *Décharger un électroscopie en le touchant avec plusieurs bandes de papier*

Au lieu de varier la largeur des bandes de papier, modifiez le nombre de bandes de papier de même largeur. Réalisez, par exemple, l'expérience avec des bandes de papier de 1 m de long et 0,5 cm de large. Chargez l'électroscopie, tenez l'extrémité de cette bande comme dans la figure 3.13 et connectez son extrémité libre au carton de l'électroscopie, en mesurant le temps de décharge.

Dans une autre expérience, nous joignons 3 bandes de papier égales à l'aide d'un trombone à chaque extrémité. Tenez l'un des trombones avec la main et touchez l'autre trombone sur le carton de l'électroscopie chargé, en mesurant le temps de décharge. Le tableau 3.7 compare les résultats de cette procédure.

TAB. 3.7 : Intervalles approximatifs pour décharger l'électroscopie.

Nombre de bandes de papier	1	3
Intervalles de temps	50 s	3 s

Expérience 3.24 — *Décharger un électroscopie en le touchant avec plusieurs fils de coton*

Au lieu de varier les sections transversales des fils de coton, modifiez le nombre de fils de coton de même section transversale. Le tableau 3.8 compare les résultats de cette procédure.

Expérience 3.25 — *Décharge de deux électroscopes reliés par plusieurs bandes de papier*

Dans un autre test, connectez deux électroscopes comme dans l'expérience 3.16. Mesurez l'intervalle de temps nécessaire pour décharger l'un des électroscopes

TAB. 3.8 : Intervalles approximatifs pour décharger l'électroscope.

Nombre de fils à coudre	1	3
Intervalles de temps	6 s	2-3 s

lorsque l'autre électroscope est mis à la terre. Nous utilisons toujours des bandes de papier de même longueur et largeur dans toutes les expériences. Au départ, les électroscopes sont connectés par une seule bande de papier et nous mesurons le temps de décharge.

Dans l'expérience suivante, connectez les deux électroscopes avec 3 bandes de papier et mesurez à nouveau le temps de décharge. Le tableau 3.9 présente les résultats de cette expérience utilisant des bandes de papier de 1 m de long et 0,5 cm de large.

TAB. 3.9 : Intervalles de temps approximatifs pour décharger l'un des électroscopes après avoir mis l'autre électroscope à la terre.

Nombre de bandes de papier	1	3
Intervalles de temps	60 s	15 s

Expérience 3.26 — *Décharge de deux électroscopes reliés par plusieurs fils de coton*

Dans un autre test, connectez deux électroscopes comme dans l'expérience 3.16. Mesurez l'intervalle de temps nécessaire pour décharger l'un des électroscopes lorsque l'autre électroscope est mis à la terre. Nous utilisons toujours des fils de coton à coudre provenant de la même bobine et de même longueur. Au départ, les électroscopes sont reliés par un seul fil de coton.

Dans l'expérience suivante, connectez les deux électroscopes avec 3 fils à coudre et mesurez à nouveau le temps de décharge. Le tableau 3.10 présente les résultats de cette expérience utilisant des fils à coudre en coton d'un mètre de long provenant de la même bobine.

TAB. 3.10 : Intervalles de temps approximatifs pour décharger l'un des électroscopes après avoir mis l'autre électroscope à la terre.

Nombre de fils à coudre	1	3
Intervalles de temps	15-20 s	16-18 s

Des expériences comme celles-ci montrent que la section transversale d'un corps a une influence sur ses propriétés conductrices ou isolantes. Plus cette section entre la

main et le carton de l'électroscope est grande, plus le temps nécessaire pour décharger l'électroscope sera court. De même, plus la section du corps reliant deux électroscopes est grande, plus le temps nécessaire pour décharger l'un des électroscopes après avoir mis l'autre à la terre en touchant son carton avec le doigt sera court.

Nous présentons maintenant quelques définitions pertinentes.

Définition 3.6

Le flux de particules électrisées à travers la section transversale d'un corps est appelé « courant électrique ». Il est proportionnel à la quantité de charge par unité de temps passant à travers la section transversale du conducteur.

Un exemple est le courant électrique qui circule à travers une bande de papier ou un fil à coudre dans ces expériences.

Ce flux de particules électrisées dépend du matériau du conducteur. Une bande de feuille d'aluminium, par exemple, conduit mieux qu'une bande de papier ordinaire de même longueur, largeur et épaisseur. Et ces deux matériaux conduisent beaucoup mieux qu'une bande de plastique de même taille. Supposons que nous voulions décharger un électroscope électrisé. Tenez une bande dans la main et touchez son extrémité libre sur le carton de l'électroscope. La quantité de charge à décharger sera toujours la même, à savoir l'électrification initiale de l'électroscope. Le temps de décharge lorsque vous le touchez avec une bande de feuille d'aluminium est plus court que le temps de décharge lorsque vous le touchez avec une bande de papier. Et ce dernier temps est beaucoup plus court que l'intervalle de temps nécessaire pour décharger le même électroscope lorsque vous le touchez avec une bande de plastique.

Considérons maintenant des conducteurs du même matériau. Dans les mêmes conditions initiales que dans les expériences précédentes, le courant électrique circulant dans un corps dépendra de sa longueur. En augmentant la longueur d'une substance entre la main et le carton de l'électroscope, nous augmentons l'intervalle de temps nécessaire pour décharger l'électroscope. De même, plus la longueur d'un corps reliant deux électroscopes chargés est grande, plus l'intervalle de temps nécessaire pour décharger l'un des électroscopes après avoir mis l'autre à la terre sera long.

Ce courant électrique dépend également de la section transversale du conducteur, en supposant les mêmes conditions initiales que dans les expériences précédentes. Plus cette section entre la main et le carton de l'électroscope est grande, plus l'intervalle de temps nécessaire pour le décharger sera court. De même, plus la section transversale d'un corps reliant deux électroscopes chargés est grande, plus l'intervalle de temps nécessaire pour décharger l'un des électroscopes après avoir mis l'autre électroscope à la terre sera court.

Définition 3.7

Nous disons que le corps reliant les deux électroscopes dans ces expériences a une « résistance électrique ». À chaque instant, cette résistance est proportionnelle à la différence de potentiel entre les deux électroscopes et inversement proportionnelle au courant électrique traversant le corps.

Supposons les mêmes conditions initiales. Par exemple, deux électroscopes chargés reliés par une bande de papier ou un fil à coudre. Reliez l'un des électroscopes à la terre en touchant son carton avec le doigt et mesurez l'intervalle de temps nécessaire pour décharger l'autre électroscope. Plus cet intervalle de temps est long, plus la résistance du corps qui les relie sera grande. Cela signifie que la résistance de ce corps est inversement proportionnelle au courant électrique qui le traverse, en supposant que la différence de potentiel entre ses extrémités soit la même. D'après les expériences précédentes, la résistance d'un corps augmente avec sa longueur et diminue avec la grandeur de sa section transversale, en fonction également de la composition matérielle ou chimique du corps.

Expérience 3.27 — *Comparaison des intervalles de temps*

Il est également intéressant de comparer les intervalles de temps des figures 3.13 et 3.14 afin de décharger un électroscope électrisé. Dans le premier cas, nous avons un électroscope chargé. Tenez une bande ou une ficelle à la main et touchez son extrémité libre sur le carton de l'électroscope, en mesurant l'intervalle de temps nécessaire pour le décharger. Dans le second cas, nous avons deux électroscopes chargés reliés par une bande ou une ficelle. Mettez l'un des électroscopes à la terre en le touchant avec la main et mesurez l'intervalle de temps nécessaire pour décharger le second électroscope. Supposons que le même corps soit utilisé pour décharger les électroscopes dans ces deux cas. Il peut s'agir, par exemple, d'une bande de papier de même longueur et de même largeur dans les deux cas. Observez que le temps de décharge dans le premier cas est généralement plus court que le temps de décharge dans le second cas.

Cette différence de temps peut s'expliquer. Dans le second cas, nous avons non seulement un électroscope chargé à décharger, mais aussi un corps chargé reliant les deux électroscopes, à savoir la bande de papier ou la ficelle de coton. Par conséquent, lorsqu'un doigt touche le premier électroscope, nous devons décharger non seulement le deuxième électroscope, mais aussi ce corps de connexion. Dans le premier cas, en revanche, il n'était pas nécessaire de décharger la bande de papier ni le fil de coton. Après tout, ces corps de connexion étaient déjà déchargés puisqu'ils étaient tenus dans la main.

Nous pouvons démontrer que la bande de papier (ou le fil de coton) reliant les deux électroscopes chargés de la figure 3.14 était également électrisée. Pour cela, placez un versorium métallique près de la bande ou du fil, dans le même plan horizontal, n'importe où le long de la bande ou du fil. Au départ, lorsque les deux électroscopes sont encore déchargés, le versorium devrait pointer dans une direction arbitraire. Raclez plusieurs fois une règle acrylique électrisée sur le carton de l'un des électroscopes. Attendez que les deux électroscopes soient également chargés. Observez que le versorium pointe désormais vers la bande. Cela indique que la bande est désormais électrisée. Il en va de même pour un fil ou une ficelle de coton reliant les deux électroscopes.

Expérience 3.28 — *Décharge successive de deux électroscopes*

Une autre expérience intéressante peut être réalisée avec les deux électroscopes de la figure 3.14. Supposons qu'une bande de papier de 1 m de long et 0,5 cm de large

relie les deux électroscopes. Supposons également que les deux électroscopes soient électrisés de manière égale au début de l'expérience. Dans ce cas, lorsque le doigt touche le carton de l'électroscope 1, sa bande de papier de soie tombe immédiatement. La bande de papier de soie de l'électroscope 2, en revanche, met environ 60 secondes pour tomber complètement pendant que le doigt touche le carton de l'électroscope 1.

Répétez cette expérience. Mais cette fois-ci, retirez votre doigt du premier électroscope 5 secondes après l'avoir touché. Sa bande de papier de soie, qui était complètement tombée, commence à remonter. Pendant que la bande 1 remonte, la bande de papier de soie de l'électroscope 2 descend légèrement. Au bout d'un certain temps, les deux bandes de papier de soie sont inclinées de la même manière par rapport à leurs cartons. Touchez le carton du deuxième électroscope avec votre doigt, puis retirez-le après 5 secondes. Le phénomène décrit ci-dessus avec les bandes de papier de soie se reproduit, mais dans les électroscopes opposés. Répétez cette procédure, en touchant à chaque fois un électroscope différent après qu'ils aient atteint un nouvel équilibre. Peu à peu, tout le système se décharge.

Expérience 3.29 — *Chargement successive de deux électroscopes*

Il est également intéressant de commencer avec les deux électroscopes déchargés. Ils sont reliés par une longue bande de papier de faible largeur. Raclez une ou deux fois une règle acrylique électrisée sur le carton de l'électroscope 1, en observant que sa bande de papier de soie se soulève presque immédiatement. La bande de papier de soie de l'électroscope 2, en revanche, se soulève lentement.

Une fois l'équilibre atteint, raclez la règle électrisée sur le carton de l'électroscope 2. Sa bande de papier de soie se soulève encore plus, une fois de plus presque instantanément. La bande de papier de soie de l'électroscope 1, en revanche, a besoin d'un intervalle de temps mesurable pour se soulever au même niveau que la bande de papier de soie de l'électroscope 2.

3.3.6 Humidité

Humidité du corps de raccordement

Expérience 3.30 — *Mise à la terre de l'électroscope avec des corps présentant différents degrés d'humidité*

Répétez les expériences de la section 3.1 et de la sous-section 3.3.4 en modifiant l'humidité du corps qui sera connecté à l'électroscope chargé de la figure 3.13. Dans tous les cas, l'électroscope sera touché avec des bandes de 30 cm de long et 0,5 cm de large provenant de la même feuille de papier. Tenez la bande à la main par son extrémité supérieure. Mesurez l'intervalle de temps nécessaire pour décharger l'électroscope à partir du moment où l'extrémité inférieure de la bande de papier touche son carton. Dans cette expérience, nous ne faisons varier que le degré d'humidité des bandes de papier. Utilisez une bande sèche dans le premier cas.

Dans le deuxième cas, utilisez une bande humide (humide sur toute sa longueur, des deux côtés, à l'aide d'un vaporisateur d'eau). Les expériences montrent que plus la

bande de papier est sèche, plus le temps de décharge sera long. Par conséquent, plus le papier est sec, plus il est isolant.

Ce comportement différent de la bande de papier est évidemment dû à la quantité d'eau absorbée. Si l'on compare les conductivités de deux colonnes de même longueur et de même section transversale, l'une d'eau douce et l'autre de papier ordinaire, on constate que l'eau est un bien meilleur conducteur que le papier. Autrement dit, elle décharge plus rapidement un électroscope électrisé. Par conséquent, lorsqu'une bande de papier absorbe de l'eau, elle devient un meilleur conducteur que le papier sec.

Il convient de noter que l'eau est absorbée sur toute la section transversale de la bande, et pas seulement à sa surface.

Humidité de l'air

Les expériences électrostatiques fonctionnent généralement bien par temps sec, produisant des effets visibles et perceptibles. L'humidité de l'air empêche l'accumulation de charges électriques, réduisant ainsi la taille ou l'ampleur des effets observables.

Expérience 3.31 — *Électroscope posé sur une table par temps sec*

Il est facile de charger un électroscope par temps sec. Frottez une paille en plastique dans des cheveux. Raclez ensuite cette paille sur le carton fin de l'électroscope, comme décrit dans l'expérience 3.1, figure 3.1. L'électroscope reste chargé pendant plusieurs secondes ou quelques minutes après cette procédure, figure 3.1 (c). Ce fait implique que l'air sec est un bon isolant, selon la définition 3.5 donnée dans la sous-section 3.3.3.

Expérience 3.32 — *Électroscope posé sur une table par temps humide*

Répétez l'expérience 3.31 par temps humide et pluvieux. Lorsque nous raclons une paille sur le carton de l'électroscope, sa bande remonte, comme dans la figure 3.15 (b).

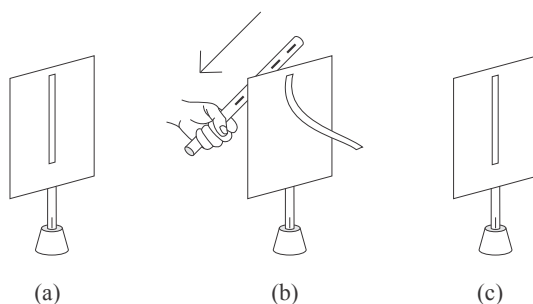


FIG. 3.15 : (a) Électroscope avec sa bande pointant vers le bas. (b) Lorsque le bord supérieur du rectangle est raclé avec une paille frottée, la bande remonte. (c) Lorsque la paille est retirée, la bande redescend presque immédiatement par temps pluvieux.

Retirez la paille frottée. La bande tombe peu après, figure 3.15 (c). Plus l'humidité de l'air est élevée, plus la décharge de l'électroscope sera rapide. En fonction de

la valeur de cette humidité, l'air peut se comporter comme un mauvais ou un bon conducteur. La présence de vapeur d'eau dans l'air humide est l'une des raisons qui le font se comporter comme un conducteur, car l'eau elle-même est un bon conducteur pour les expériences habituelles d'électrostatique.¹⁰ Une surface chargée peut attirer des molécules ou des gouttes d'eau qui, au contact, se chargent et sont ensuite repoussées par la surface. Voir le mécanisme *ACR* décrit dans la section 4.4. Ce processus peut décharger la surface.

Par temps humide, l'électroscope présente un comportement anormal par rapport à ce qui se passe par temps sec. Par exemple, il est plus difficile de le charger. De plus, l'électroscope chargé se décharge plus facilement par temps humide que par temps sec. Deux facteurs principaux influencent le comportement des électroscopes, le facteur *I* et le facteur *II*. L'électroscope est entouré d'air et relié au sol par la paille en plastique qui soutient son carton. Il peut se décharger par l'air ambiant (facteur *I*) ou par la paille en plastique qui le soutient (facteur *II*). La section 3.1 a montré que l'eau fraîche et l'eau de pluie se comportent comme de bons conducteurs pour les expériences électrostatiques. Facteur *I* : l'humidité de l'air augmente la conductivité de l'atmosphère. Par conséquent, un électroscope électrisé peut facilement perdre sa charge dans l'environnement environnant. Facteur *II* : la vapeur d'eau peut également se condenser à la surface de tout matériau connecté à la terre et soutenant son carton, comme la paille en plastique. Cette humidité accumulée à la surface de la paille peut la faire se comporter comme un conducteur, facilitant le flux de particules électrisées vers la terre. Cet effet est particulièrement pertinent pour les matériaux hydrophiles.

3.3.7 Orientation du corps par rapport à la tension appliquée

Il existe certains matériaux anisotropes dont la résistance électrique varie en fonction de la direction ou de l'orientation du corps. Le graphite, par exemple, a une structure stratifiée ou plane. Sa résistance électrique est faible le long du plan des couches et élevée dans une direction orthogonale à ces couches.

Il existe certains matériaux polaires qui se comportent comme des conducteurs dans un sens et comme des isolants dans le sens opposé. Autrement dit, ils ont une faible résistance au flux de courant dans un sens et une résistance élevée dans le sens contraire. L'exemple le plus courant et le plus important est la diode semi-conductrice. Elle est facile à se procurer à bas prix dans les magasins d'électronique (quelques centimes par diode). Elle a de nombreuses applications dans l'industrie électronique, où elle est utilisée comme redresseur de courant électrique, interrupteur, etc. La figure 3.16 (a) montre à quoi elle ressemble, tandis que la figure 3.16 (b) présente son symbole dans un schéma de circuit. Ses deux bornes sont appelées anode et cathode.

Expérience 3.33 — Polarité de la diode

Observez le comportement d'une diode dans un circuit simple contenant une petite ampoule de 1,5 volt et une douille, une ou plusieurs piles de 1,5 V, ainsi que quelques morceaux de fil métallique. Utilisez une seule pile ou deux piles connectées en série. Montez un testeur de circuit comme celui de la figure 3.17 (a). Dans

¹⁰Sections 7.11 et 7.13 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

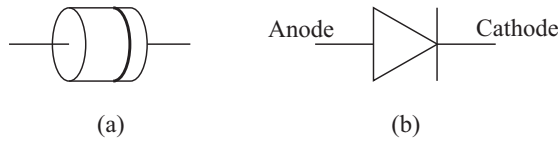


FIG. 3.16 : (a) Représentation d'une diode réelle. (b) Symbole utilisé dans un schéma de circuit.

cette configuration, l'ampoule doit s'allumer, indiquant non seulement que toutes les connexions électriques ont été correctement effectuées, mais aussi que la diode dans cette orientation se comporte comme un conducteur. Dans cette configuration, la diode est « polarisée en sens direct », l'anode de la diode étant connectée à la borne positive de la pile.

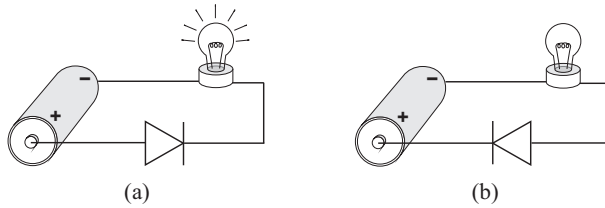


FIG. 3.17 : (a) La diode est polarisée en sens direct et se comporte comme un conducteur. Le courant peut circuler dans cette orientation. (b) La diode est polarisée en sens inverse et se comporte comme un isolant. Le courant ne peut pas circuler dans cette orientation.

Lorsque la polarité de la diode est inversée, comme dans la figure 3.17 (b), l'ampoule ne s'allume pas. Dans cette configuration, l'anode de la diode est connectée à la borne négative de la batterie. La diode est « polarisée en sens inverse » et se comporte comme un isolant.

Ce comportement est fascinant. La simple orientation de la diode par rapport à la batterie modifie complètement ses propriétés conductrices. Cette expérience montre que la diode est polaire. Il n'est pas facile de comprendre comment elle peut agir ainsi. Il est difficile d'expliquer sa constitution interne en termes simples. Quoi qu'il en soit, après avoir compris son fonctionnement dans des expériences comme celle-ci, il est alors facile de l'utiliser dans de nombreuses applications différentes.

Expérience 3.34 — *Application d'une haute tension à une diode*

L'expérience 3.33 a utilisé une diode, une pile, une ampoule et quelques morceaux de fil métallique. Elle a montré qu'une diode peut se comporter comme un conducteur ou un isolant, selon son orientation par rapport à la pile. Ce comportement conducteur ou isolant de la diode dépend de la différence de potentiel agissant entre ses extrémités. Dans cette expérience, une ou plusieurs piles ont généré une différence de potentiel de quelques volts entre ses extrémités. Dans les expériences électrosta-

tiques, en revanche, nous travaillons généralement avec des différences de potentiel allant de 1 000 V à 10 000 V.

La présente expérience analyse le comportement d'une diode en électrostatique.

Chargez un électroscope, figure 3.18 (a). Tenez la diode avec sa cathode dans la main et touchez son anode sur le carton de l'électroscope chargé. La bande de papier de soie tombe immédiatement, figure 3.18 (b). Cette bande reste verticale après que la diode a été retirée, indiquant que l'électroscope a été déchargé.

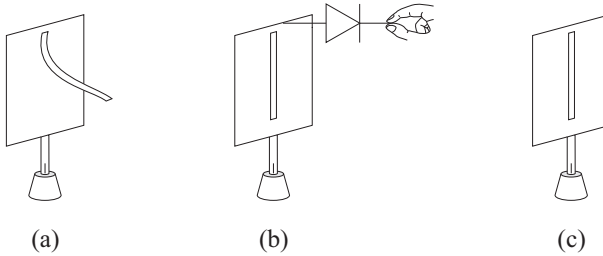


FIG. 3.18 : (a) Un électroscope chargé. (b) Tout en tenant la cathode de la diode dans la main, touchez son anode sur le carton de l'électroscope, en observant que sa bande tombe immédiatement. (c) La bande reste verticale après que la diode a été retirée.

L'électroscope se décharge également lorsque la diode est tenue par son anode, tandis que sa cathode touche le carton de l'électroscope, figure 3.19.

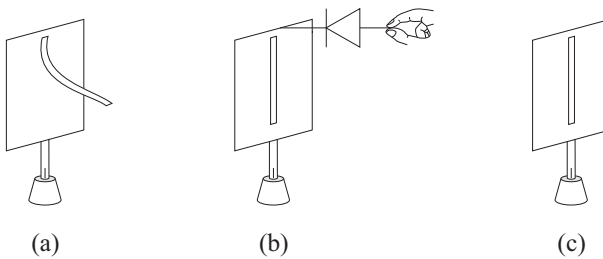


FIG. 3.19 : (a) Un électroscope chargé. (b) Tout en tenant l'anode de la diode dans la main, touchez sa cathode sur le carton de l'électroscope, en observant que sa bande tombe immédiatement. (c) La bande reste verticale après que la diode a été retirée.

En conclusion, la diode se comporte comme un conducteur dans les expériences électrostatiques non seulement lorsqu'elle est polarisée en sens direct, mais aussi lorsqu'elle est polarisée en sens inverse. C'est un autre exemple qui montre que les propriétés conductrices ou isolantes d'un corps dépendent non seulement de la nature ou de la composition chimique du corps, mais aussi de la différence de potentiel externe appliquée aux extrémités du corps, comme le montre la sous-section 3.3.2.

Nous n'avons pas précisé dans cette expérience si l'électroscope était chargé positivement ou négativement. Cet aspect n'est pas pertinent pour le résultat de l'expérience. Autrement dit, les comportements indiqués par les figures 3.18 et 3.19 se

produisent non seulement pour un électroscope chargé positivement, mais aussi pour un électroscope chargé négativement. Dans ces deux cas, la diode se comporte comme un conducteur, qu'elle soit polarisée en sens direct ou inverse.

Expérience 3.35 — Polarité de la LED

Il existe certains types spéciaux de diodes qui émettent de la lumière, appelées diodes électroluminescentes ou LED. Elles se présentent sous différentes formes. La figure 3.20 (a) montre à quoi elles ressemblent, tandis que la figure 3.20 (b) montre leur symbole dans un schéma de circuit. Elles sont bon marché et faciles à trouver dans les magasins d'électronique (quelques centimes par LED). Elles s'allument lorsque l'on applique une tension de 1,5 V ou 3 V à leurs pattes.

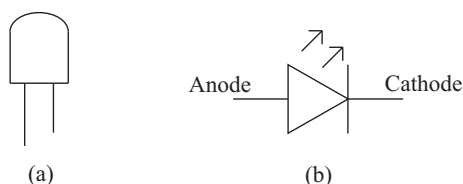


FIG. 3.20 : (a) Représentation d'une LED réelle. (b) Symbole utilisé dans un schéma de circuit.

Elles peuvent remplacer les ampoules des sections 2.7, 3.2 et de la sous-section 3.3.2. Cependant, gardez à l'esprit qu'elles sont polarisées, comme toute autre diode. Autrement dit, lorsque la LED est polarisée en sens direct, elle s'allume, comme indiqué dans la figure 3.21. Dans cette configuration, la borne positive de la batterie est connectée à l'anode de la LED, tandis que la borne négative de la batterie est connectée à sa cathode.

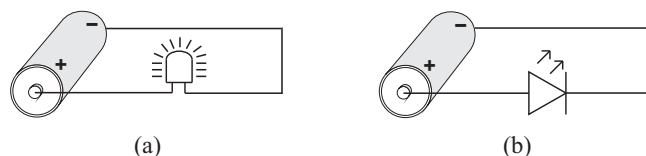


FIG. 3.21 : (a) LED allumée en polarisation directe. (b) LED représentée dans un schéma de circuit.

Cependant, lorsqu'elle est polarisée en sens inverse, elle ne s'allume pas, comme indiqué dans la figure 3.22.

3.3.8 Température

La résistance électrique de nombreux matériaux varie en fonction de leur température. Dans le cas des métaux, par exemple, leur résistance augmente avec la température, mais pas de manière linéaire. Certaines substances métalliques deviennent supraconductrices (résistance nulle) à des températures suffisamment basses.

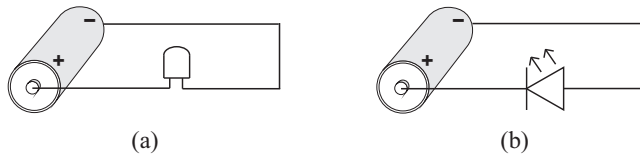


FIG. 3.22 : (a) LED éteinte en polarisation inverse. (b) LED représentée dans un schéma de circuit.

La résistance électrique des isolants varie également avec la température, mais leur comportement n'est pas aussi simple que celui des métaux. Dans certains isolants, la résistance diminue avec l'augmentation de la température. Cette relation n'est généralement pas linéaire.

En général, la résistance des semi-conducteurs diminue avec l'augmentation de la température. Pour certains matériaux, elle suit une loi exponentielle.

Il existe certains matériaux appelés thermistances dont la résistance dépend fortement de la température. Dans certains d'entre eux, la résistance diminue lorsque la température augmente, tandis que dans d'autres, elle augmente lorsque la température augmente.

3.3.9 Illumination

Il existe certains matériaux, généralement des semi-conducteurs, dont la résistance varie en fonction de l'intensité de la lumière incidente. On les appelle photorésistances, résistances dépendantes de la lumière (LDR) ou cellules photoélectriques. Normalement, leur résistance diminue lorsque l'intensité de la lumière incidente augmente, présentant ainsi une photoconductivité. Ils peuvent se comporter comme des isolants dans l'obscurité et comme des conducteurs à la lumière du jour. Ils sont utilisés comme capteurs de lumière, dans le contrôle de l'éclairage, comme circuits de détection sensibles à la lumière, circuits de commutation de lumière, dispositifs d'alarme, détecteurs d'incendie, dispositifs de mesure de l'intensité lumineuse, éclairage public, détecteurs infrarouges, etc.

3.3.10 Autres facteurs

Il existe plusieurs autres facteurs internes et externes qui peuvent avoir une incidence sur le comportement conducteur ou isolant d'un corps. Exemples : pression, impuretés dans la composition du corps, son processus de fabrication, etc. La conductivité de l'air, par exemple, varie en fonction de la pression. Ces autres facteurs ne seront pas abordés dans cet ouvrage. Il est important de garder à l'esprit qu'aucun matériau n'est conducteur ou isolant en soi. Il ne fait que « se comporter comme » un conducteur ou un isolant. Ce comportement dépend non seulement de certaines propriétés intrinsèques du corps, mais aussi des conditions externes auxquelles il est soumis. En modifiant ces facteurs internes et externes, vous pouvez modifier les propriétés conductrices ou isolantes de n'importe quel matériau.

3.4 Lois relatives aux circuits électriques transportant des courants continus

Cette section présente brièvement certaines des principales lois relatives aux circuits électriques transportant des courants continus.

Luigi Galvani (1737–1798) était un scientifique italien et professeur d’anatomie à l’université de Bologne. Il a mené d’importantes recherches sur l’électricité animale dans les années 1780. Il a notamment observé que les muscles des pattes de grenouilles mortes se contractaient lorsqu’on touchait leurs nerfs avec un arc métallique, et a publié un ouvrage célèbre sur ce sujet. Alessandro Volta (1745–1827) s’est intéressé à ce sujet. Au départ, il a accepté les idées de Galvani sur l’électricité animale, mais il a ensuite complètement rejeté ce concept. Selon Volta, l’essence de cet effet était liée à un arc bimétallique touchant les nerfs de la grenouille. Au cours de cette controverse, il a construit sa célèbre pile électrique entre 1795 et 1799. En 1800, il publia ses découvertes dans un article très important traduit en plusieurs langues.¹¹ Depuis lors, les scientifiques disposaient d’une source contrôlée de courant continu alimentée par une source à basse tension.

En travaillant avec une pile voltaïque, H. C. Ørsted (1777–1851) observa en 1820 la déviation d’une aiguille aimantée à proximité d’un long fil conducteur de courant continu. Son ouvrage de quatre pages décrivant cette découverte eut un grand impact sur de nombreux scientifiques et fut traduit dans plusieurs langues.¹² À la suite de ces recherches, Thomas Johann Seebeck (1770–1831) découvrit l’effet thermoélectrique en 1821. Il observa notamment qu’une aiguille de boussole était déviée par une boucle fermée formée par deux métaux différents reliés en deux points, dès lors qu’il y avait une différence de température entre les deux points de jonction. Ce phénomène indiquait la présence d’un courant électrique circulant autour de la boucle.

Humphry Davy (1778–1829) était un chimiste anglais qui travaillait également dans le domaine de l’électricité. En 1821, il découvrit que le pouvoir conducteur d’un fil métallique connecté aux bornes d’une pile voltaïque est inversement proportionnel à sa longueur, directement proportionnel à sa section transversale, et indépendant de la forme de cette section transversale. Il en conclut alors qu’un courant constant circule sur toute la section transversale du métal et pas seulement à sa surface. Entre 1823 et 1826, Antoine-César Becquerel (1788–1878) confirma ces résultats par des recherches indépendantes.

Georg Simon Ohm (1789–1854) était un scientifique allemand influencé par les découvertes de Volta, d’Ørsted et de Seebeck. Entre 1825 et 1827, il a mené d’importantes expériences sur les circuits électriques transportant des courants continus. Au départ, il a travaillé avec une pile voltaïque. Les premières piles n’étaient pas stables et perdaient rapidement leur puissance, ce qui réduisait la différence de potentiel entre leurs bornes. Il a alors décidé d’utiliser un couple thermoélectrique comme source de tension constante. L’avantage de cette source, par rapport aux premières piles, était que lorsque les deux jonctions de sa source étaient maintenues à des températures constantes, il pouvait obtenir une différence de tension qui restait constante pendant

¹¹ [Vol00a], [Vol00b], [Vol64], [Mag06] et [MA08].

¹² [Oer20b], [Oer20a], [Oer65], [Fra81] et [Ørs86].

toute la durée de ses expériences. Il a également étudié la conductivité de différents métaux. Il a étudié le courant produit dans son circuit en fonction de la composition des fils connectés entre les bornes de sa source de tension. Il a également analysé comment le courant produit était influencé par la longueur du métal, par sa section transversale et par la différence de « force électroscopique » entre les extrémités du fil. Il a identifié cette force électroscopique (une expression qu’il a lui-même inventée) avec la densité volumique de charge. Ce n’est qu’en 1849 que G. Kirchhoff (1824–1887) a correctement identifié la force électroscopique d’Ohm avec le concept de potentiel électrostatique. Ces recherches ont abouti à ce que l’on appelle la loi d’Ohm dans les manuels scolaires.¹³ Selon cette loi, la différence de potentiel agissant entre les extrémités d’un métal est directement proportionnelle au courant électrique qui le traverse. La constante de proportionnalité est appelée résistance du métal. Elle dépend du type de métal, étant directement proportionnelle à la longueur du fil et inversement proportionnelle à sa section transversale.

¹³[Ohm25], [Ohm26], [Ohm66], [OF38], [Whe43], [Kir49], [Kir50], [Ros90, pp. 210–214 et 494–499], [Ram53], [Sch63], [Whi73a, pp. 88–93 et 224–226], [JM86, pp. 51–62], [Ach96, chapitres 6, 9, 10, 11 et 12], [Kip09], [Här12] et [BW10].

Chapitre 4

Conducteurs et isolants dans quelques expériences simples

4.1 Conducteurs et isolants dans l'effet de l'ambre

La plus ancienne expérience sur l'électricité est ce qu'on appelle l'effet de l'ambre, section 1.1. Presque tout le monde a réalisé une expérience similaire au lycée. Frottez un stylo en plastique ou une règle en acrylique dans des cheveux. Il attire alors les morceaux de papier éparpillés sur la table. Le volume 1 de cet ouvrage présente une description de ce qui se passe dans cet effet, ainsi que de nombreuses expériences qui y sont liées.¹ La présente section montre que notre compréhension de ce qui se passe dans cet effet est différente de l'explication que l'on trouve dans la plupart des manuels scolaires.

Supposons que de nombreux morceaux de papier reposent sur une table. Électrisez un peigne en plastique en le frottant dans des cheveux. Approchez-le des morceaux de papier. Lorsqu'il est suffisamment proche, certains morceaux de papier sont visiblement attirés par lui et s'élèvent vers le plastique frotté. C'est le phénomène observé. Nous allons maintenant examiner son explication, en commençant par ce qui est généralement indiqué dans les manuels scolaires.

4.1.1 Explication de l'effet de l'ambre dans les manuels scolaires

Dans la plupart des manuels scolaires, les auteurs affirment qu'un morceau de matière plastique frotté (peigne, règle, etc.) devient électrisé. Il polarise les molécules de tout morceau de papier se trouvant à proximité sur une table. Selon ces manuels, la partie de chaque molécule qui est plus proche du plastique électrisé s'électrifie avec des charges de signe opposé à celles du plastique électrisé. La partie de chaque molécule qui est plus éloignée du plastique électrisé s'électrifie avec des charges de même signe que celles du papier électrisé. Les corps électrisés avec des charges de même signe se repoussent, tandis que ceux électrisés avec des charges opposées s'attirent. La force

¹Section 8.3 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

électrique diminue à mesure que la distance entre les charges en interaction augmente. Par conséquent, la partie de chaque molécule qui est plus proche du plastique sera attirée vers le plastique électrisé avec une force d'intensité supérieure à la répulsion exercée par le plastique sur la partie de chaque molécule qui en est plus éloignée. Chaque molécule polarisée du papier serait alors attirée vers le morceau de plastique frotté. Il y aurait une force d'attraction nette F exercée par le plastique frotté sur toutes les molécules d'un morceau de papier. Si cette force F est supérieure au poids W du papier, alors le papier s'élèvera vers le plastique frotté. En substance, l'explication typique de la force d'attraction exercée par le plastique frotté sur un morceau de papier repose sur la différence entre les forces d'attraction et de répulsion exercées par le plastique électrisé sur les parties opposées de chaque molécule polarisée du papier. La figure 4.1 illustre cette explication.

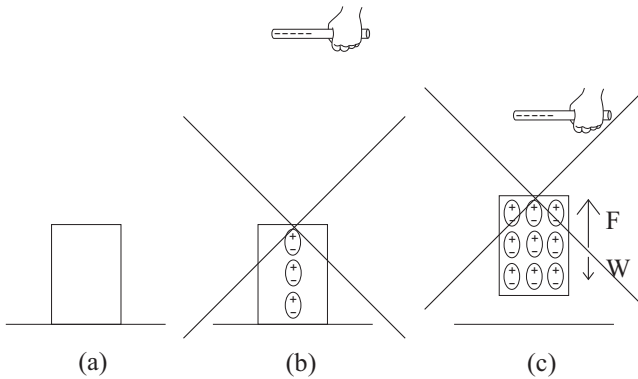


FIG. 4.1 : Explication typique de l'effet de l'ambre. (a) Un morceau de papier sur la table. (b) Molécules polarisées du papier en raison de la présence d'une paille en plastique électrisée à proximité. (c) Lorsque la paille en plastique se rapproche encore davantage, la polarisation des molécules augmente. Si la force d'attraction F exercée par le plastique électrisé sur toutes les molécules est supérieure au poids W du papier, celui-ci sera attiré vers le plastique électrisé.

Nous pensons que cette explication de l'effet de l'ambre n'est pas correcte. C'est pourquoi nous avons dessiné un grand symbole « \times » sur la figure 4.1. Le phénomène présenté dans les manuels scolaires peut se produire. Mais même lorsque les molécules du papier sont polarisées par le morceau de plastique frotté à proximité, cette polarisation ne devrait pas être le principal facteur responsable de l'attraction du petit morceau de papier. Dans cette description présentée par la plupart des manuels scolaires, il est implicitement supposé que les morceaux de papier se comportent comme des isolants. Cependant, la plupart des types de papier et la majorité des substances légères généralement attirées par un morceau d'ambre frotté ou par un morceau de plastique frotté se comportent comme des conducteurs.

De plus, les manuels scolaires ne traitent pas de la nature du support sur lequel les morceaux de papier se trouvent initialement. Autrement dit, ils ne mentionnent pas si ce support se comporte comme un conducteur ou un isolant.

4.1.2 Notre explication de l'effet de l'ambre

Nous présentons maintenant notre description des principaux phénomènes liés à l'effet de l'ambre. La figure 4.2 (a) illustre le petit morceau de papier représenté par la lettre C , indiquant qu'il s'agit d'un conducteur. Nous supposons ici qu'il repose sur une surface isolante I .

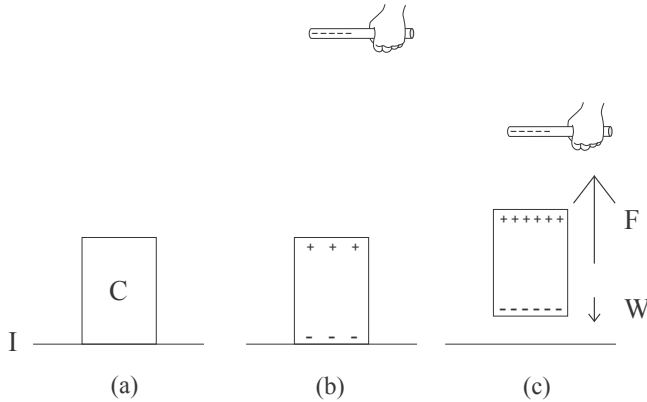


FIG. 4.2 : (a) Morceau de papier conducteur C sur une surface isolante I . (b) Polarisation macroscopique du conducteur due à la présence d'un morceau de plastique électrisé à proximité. (c) Lorsque le plastique se rapproche encore davantage, la quantité de charges polarisées sur le papier augmente. Si la force d'attraction F exercée par le plastique électrisé sur le papier conducteur macroscopiquement polarisé est supérieure au poids W du papier, celui-ci sera attiré vers le plastique.

Dans cette configuration, le principal effet qui se produit lorsqu'un plastique frotté s'approche de ces matériaux conducteurs est leur polarisation macroscopique. C'est-à-dire une véritable séparation des charges sur tout le volume du matériau. Au lieu d'une simple polarisation des molécules du papier, la présence du morceau de plastique électrisé à proximité crée une séparation macroscopique des particules électrisées sur toute la surface du papier. La figure 4.2 (b) illustre qualitativement cette polarisation macroscopique d'un morceau de papier lorsqu'il est posé sur une surface isolante I . Nous n'avons pas représenté dans cette figure les molécules polarisées de la surface isolante. Lorsque le plastique se rapproche encore davantage, la quantité de charges polarisées sur le papier augmente. Si la force d'attraction F exercée par le plastique électrisé sur le papier conducteur macroscopiquement polarisé est supérieure au poids W du papier, celui-ci sera attiré vers le plastique, figure 4.2 (c).

Supposons deux corps de même taille, poids et forme. L'un est conducteur et l'autre isolant. Ils sont au repos sur une table isolante, loin l'un de l'autre. Supposons en outre qu'un plastique électrisé se déplace vers ces corps, arrivant à la même petite distance d des deux corps. Lorsqu'il se trouve à cette distance d du corps isolant, les molécules du corps se polarisent. Cette polarisation microscopique entraînera une polarisation effective de l'ensemble du corps isolant. En revanche, lorsque le plastique électrisé se trouve à cette même distance d du corps conducteur, il provoquera

une polarisation macroscopique du conducteur. Cette polarisation macroscopique du conducteur sera supérieure à la polarisation effective de l'isolant. La figure 4.1 (c) illustre la polarisation du morceau de papier telle qu'elle est présentée dans les manuels scolaires. Ceux-ci considèrent, à tort, le morceau de papier comme un isolant. La polarisation effective de ce morceau de papier est représentée par trois charges positives sur la partie supérieure du papier et trois charges négatives sur sa partie inférieure, tandis que les charges positives et négatives à l'intérieur s'annulent essentiellement les unes les autres. La figure 4.2 (c), en revanche, illustre qualitativement la polarisation réelle du papier en le considérant comme un matériau conducteur. Elle est représentée par six charges positives dans sa partie supérieure et six charges négatives dans sa partie inférieure. Cette polarisation est plus importante que la polarisation effective du matériau isolant représenté dans la figure 4.1 (c). Comme cette polarisation macroscopique d'un matériau conducteur est plus importante que la polarisation effective d'un matériau isolant, la force d'attraction nette F exercée par le plastique frotté sur le papier polarisé est représentée dans la figure 4.2 (c) par un vecteur de plus grande amplitude que la force d'attraction F représentée dans la figure 4.1 (c).

Cependant, le comportement d'attraction le plus courant observé dans l'effet ambre se produit lorsqu'un corps conducteur léger repose sur un support conducteur C , figure 4.3 (a).

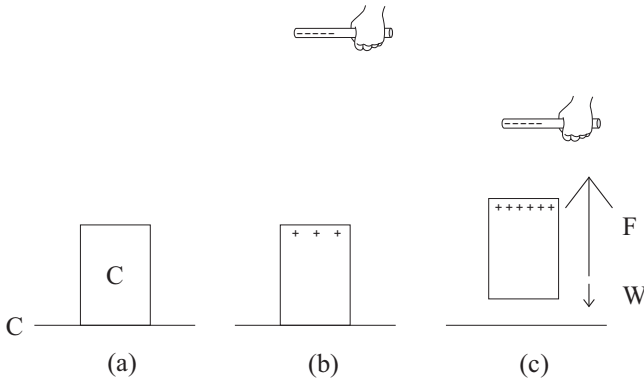


FIG. 4.3 : (a) Morceau de papier conducteur C posé sur une surface conductrice C . Ce papier est initialement mis à la terre. (b) Lorsqu'une paille électrisée s'approche du papier, celui-ci acquiert une charge nette de signe opposé à celui de la paille. (c) Lorsque le plastique s'approche encore davantage, la quantité de charges sur le papier augmente. Si la force d'attraction F est supérieure au poids W du papier, celui-ci se déplace vers la paille.

Exemples de cette configuration : morceaux de papier sur le sol, sur une table en bois (le bois ne doit pas être verni), sur une surface métallique, etc. Lorsqu'un morceau de papier conducteur se trouve sur un support conducteur, le papier est mis à la terre. Par conséquent, lorsqu'un morceau de plastique électrisé s'approche du papier, celui-ci acquiert une charge nette de signe opposé à celle du plastique électrisé. Cette configuration est représentée dans la figure 4.3 (b). Dans cette image, nous n'avons

pas représenté les charges nettes sur la surface conductrice. Lorsque le plastique se rapproche encore plus, la quantité de charges sur le papier augmente. Si la force d'attraction F est supérieure au poids W du papier, celui-ci se déplace vers la paille, figure 4.3 (c).

La force nette ou totale F exercée par le plastique électrisé sur le morceau de papier qui se trouvait sur une surface conductrice, figure 4.3 (c), est supérieure à la force nette représentée dans la figure 4.2 (c).

Les figures 4.1 (c), 4.2 (c) et 4.3 (c) supposent que la paille en plastique est électrisée de manière égale dans tous les cas. De plus, elle est toujours dessinée à la même distance d d'un morceau de papier spécifique qui se déplace vers elle. La taille des flèches indique l'intensité de la force F exercée par la paille électrisée sur le papier. La force F de la figure 4.2 (c) est plus grande que la force de la figure 4.1 (c) car la polarisation d'un conducteur est plus grande que la polarisation effective d'un isolant. La force F de la figure 4.3 (c) est plus grande que la force de la figure 4.2 (c) car le papier de la figure 4.3 (c) a une charge nette différente de zéro, tandis que le papier de la figure 4.2 (c) est seulement polarisé, sans charge nette.

C'est un préjugé erroné largement répandu dans les manuels scolaires et dans l'esprit de nombreux enseignants et élèves que de supposer que des matériaux tels que le papier, le bois, le verre et le caoutchouc se comportent toujours comme des isolants. Ce comportement peut se produire à basse tension. Cependant, il ne se produit généralement pas dans les expériences électrostatiques impliquant des différences de potentiel allant généralement de 1 000 V à 10 000 V. Lorsque nous appliquons ces tensions élevées entre les extrémités d'un morceau de papier, de bois, de verre ou de caoutchouc, ce matériau se comporte généralement comme un conducteur. Ces tensions élevées sont très courantes dans les expériences similaires à l'effet de l'ambre. C'est pourquoi nous avons pris soin de présenter une description détaillée de cet effet dans le volume 1 de cet ouvrage, en montrant plusieurs figures didactiques.²

La première expérience présentée dans le volume 1 de notre livre portait sur l'effet de l'ambre. La dernière expérience du volume 1 présentait un phénomène analogue. Cette dernière expérience nous a permis de tester la charge nette acquise par le morceau de papier attiré. De plus, le volume 1 traitait de plusieurs instruments en papier dans lesquels le papier se comportait comme un conducteur. Nous avons également utilisé dans ces instruments des substances conductrices analogues, telles que le carton et le papier de soie. Nous pouvons citer en particulier le pendule électrique et l'électroscope.³ Cette organisation du livre a été faite exprès. Nous y avons réfléchi attentivement. Il est très simple de réaliser une expérience analogue à l'effet de l'ambre. Cependant, il est complexe de décrire correctement les nombreux facteurs importants associés à ce phénomène.

²Section 8.3 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

³Sections 2.1, 2.2, 4.4, 6.1, 6.5 et 7.15 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

4.1.3 Il est important de présenter une explication détaillée de l'effet de l'ambre

La sous-section 4.1.1 présentait l'explication des manuels scolaires relative à l'effet de l'ambre. Notre propre explication de cet effet a été présentée dans la sous-section 4.1.2. Notre description est très différente de celle qui figure dans les manuels scolaires habituels. Nous considérons qu'il est important de corriger les manuels scolaires pour plusieurs raisons :

- L'effet de l'ambre est la plus ancienne expérience sur l'électricité. Les manuels modernes ne devraient pas présenter une explication erronée de ce phénomène ancien.
- La plupart des gens ont réalisé une expérience analogue au lycée, juste pour s'amuser, comme un jeu d'enfant. Ils ont frotté une paille en plastique ou une règle en acrylique dans leurs cheveux et ont attiré des morceaux de papier posés sur une table. Parfois, cette activité amusante sera l'une des rares expériences de physique qu'ils réaliseront dans leur vie, en particulier pour ceux qui abandonnent leurs études après le lycée ou pour ceux qui suivent des études de sciences humaines ou de sciences biologiques à l'université. Il est donc important de présenter une image claire et correcte de cet effet.
- L'explication de la sous-section 4.1.1 peut être considérée comme plus simple que la description présentée dans la sous-section 4.1.2. Même si c'est le cas, il vaut mieux présenter une description minutieuse et complexe qui est essentiellement correcte, plutôt qu'une explication simple mais erronée. L'explication la plus simple n'est pas toujours la meilleure. Nous apprenons de nombreux aspects importants lorsque nous réfléchissons attentivement à ce qui se passe dans un phénomène apparemment simple. Nous réalisons qu'il existe de nombreux aspects pertinents à prendre en compte pour le décrire correctement.
- Même certains phénomènes apparemment simples et quotidiens peuvent cacher des surprises et des subtilités pertinentes, comme c'est le cas avec l'effet de l'ambre.
- La description correcte de ce phénomène nécessite de comprendre ce que sont les conducteurs et les isolants, ainsi que certaines de leurs principales propriétés. Lorsque nous comprenons ces aspects, nous commençons à avoir une image plus complète de ce qui se passe dans ce phénomène. Nous pouvons alors prendre en compte ces aspects extrêmement importants lors de l'analyse d'autres phénomènes naturels plus complexes.
- Grâce à une explication correcte, nous apprenons que les corps légers (tels que des morceaux de papier, des plumes de duvet ou un fil de coton) attirés par le plastique frotté se comportent normalement comme des conducteurs dans les expériences électrostatiques.
- Avec une explication correcte, nous apprenons également que la surface sur laquelle reposent les corps légers avant l'attraction (les surfaces en métal ou en

bois, par exemple) se comporte normalement comme une surface conductrice et mise à la terre dans les expériences électrostatiques.

Ces deux derniers points sont des aspects très importants que tout le monde devrait apprendre. En comprenant ces deux faits, nous sommes alors en mesure d'expliquer de nombreux autres phénomènes curieux liés à l'électricité.

4.2 Conducteurs et isolants dans l'expérience sur l'attraction d'un filet d'eau

Beaucoup de gens ont déjà réalisé ou au moins observé une expérience simple décrite dans de nombreux manuels sur l'électricité, qui montre l'attraction d'un filet d'eau sortant d'un robinet, comme dans l'expérience 3.7. Supposons qu'une paille en plastique ait été chargée négativement par frottement. Approchez-la du filet. L'eau se courbe vers la paille, figure 3.8. Cette attraction représente le phénomène observé. Dans le volume 1 de cet ouvrage, nous avons présenté une description détaillée des origines de cette attraction du filet.⁴ Nous tenons à souligner ici que cette description diffère des explications fournies dans la plupart des manuels didactiques.

4.2.1 Explication de l'attraction d'un filet d'eau dans les manuels scolaires

La plupart des manuels traitant de ce phénomène mentionnent que l'eau est composée de molécules polaires. En raison de la différence d'électronégativité entre les atomes d'oxygène et d'hydrogène liés, il existe un moment dipolaire permanent dans chaque molécule. L'atome d'oxygène est chargé négativement, tandis que les atomes d'hydrogène sont chargés positivement. Ce déséquilibre entraîne un moment dipolaire moléculaire, pointant de l'atome d'oxygène négatif vers une région positive entre les deux atomes d'hydrogène. Par conséquent, même en l'absence d'influence extérieure, chaque molécule d'eau possède en permanence un côté positif et un côté négatif de magnitude égale. L'explication de la courbure du filet dans les manuels scolaires repose essentiellement sur cette propriété des molécules d'eau. Au départ, chaque molécule d'eau pointe dans une direction arbitraire. Ils mentionnent que lorsqu'un corps électrisé s'approche du filet, ces molécules polaires sont orientées par ce corps. Considérons une paille négative proche du filet. En raison de la force électrique exercée par le plastique électrisé sur les parties électrisées de chaque molécule, les molécules d'eau polaires tourneront. En particulier, le côté positif de chaque molécule pointera vers la paille négative, se rapprochant d'elle, tandis que le côté négatif de chaque molécule s'en éloignera, s'éloignant légèrement de la paille. La force électrique diminue avec l'augmentation de la distance entre les corps en interaction. Par conséquent, la partie positive de chaque molécule orientée sera attirée par la paille avec une force légèrement supérieure à la force répulsive agissant sur la partie négative de chaque molécule. Il resterait une force d'attraction nette sur chaque molécule d'eau pointant

⁴Sections 2.5 et 7.11 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

vers la paille électrisée. Selon les manuels scolaires, cela expliquerait la courbure du filet, comme le montre qualitativement la figure 4.4.

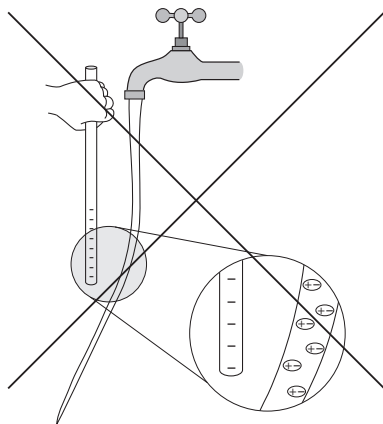


FIG. 4.4 : Explication erronée de la déviation du filet d'eau due à l'orientation des molécules polaires de l'eau lorsqu'une paille frottée s'approche de l'eau.

Nous pensons que cette explication n'est pas correcte. C'est pourquoi nous avons dessiné un grand symbole « × » sur la figure 4.4. Les manuels scolaires partent implicitement du principe que l'eau est un isolant. Si tel était le cas, elle ne contiendrait aucune charge libre susceptible de se déplacer dans tout le volume d'eau. La paille électrisée ne pourrait alors qu'orienter les molécules polaires. Nous ne doutons pas que les molécules d'eau soient polaires et puissent effectivement être orientées par la paille électrisée. Cependant, ce n'est pas le principal mécanisme responsable de la courbure du filet.

4.2.2 Notre explication de l'attraction d'un filet d'eau

Nous présentons maintenant notre description de ce phénomène. La principale différence entre notre description et l'explication donnée dans les manuels scolaires réside dans le fait que nous considérons l'eau du robinet comme un bon conducteur dans les expériences électrostatiques. Après tout, elle décharge un électroscope chargé, comme le montre l'expérience 3.5, figure 3.6. Bien sûr, l'eau du robinet est principalement composée de molécules polaires H_2O . Mais elle contient également des sels, diverses impuretés, des ions H_3O^+ et OH^- , ainsi que d'autres ions, etc. Ces substances font que l'eau se comporte comme un conducteur.

Considérons d'abord un robinet qui goutte, figure 4.5 (a).

Une paille chargée négativement dévie la trajectoire des gouttes d'eau proches, figure 4.5 (b). Supposons que la paille soit éloignée du robinet et qu'elle n'ait d'effet que sur les gouttes d'eau proches. Supposons que l'eau se comporte comme un conducteur. Lorsqu'une paille négative s'approche des gouttes, celles-ci se polarisent. Il y a une véritable séparation des charges dans chaque goutte. La partie la plus proche de la

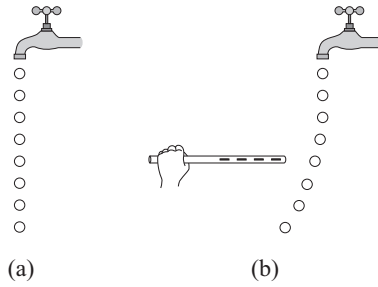


FIG. 4.5 : (a) Un robinet qui goutte. (b) Une paille chargée négativement attire les gouttes d'eau.

goutte devient électrisée positivement, tandis que la partie la plus éloignée devient électrisée négativement, figure 4.6.



FIG. 4.6 : Une goutte d'eau polarisée par la paille négative.

L'intensité de la force électrique augmente lorsque la distance entre les corps en interaction diminue. Par conséquent, la partie positive de la goutte est attirée par la paille avec une force plus forte que la force répulsive agissant sur la partie négative de la goutte. Ce déséquilibre des forces produit une force d'attraction totale agissant sur la goutte. Celle-ci se déplace alors vers la paille.

Considérons maintenant un filet d'eau continu. Lorsqu'une paille négative se déplace vers le filet, l'eau se courbe. La partie du filet la plus proche de la paille devient chargée positivement, tandis que la partie la plus éloignée de la paille devient chargée négativement. Dans le cas d'un filet continu, la partie la plus éloignée de la paille négative est neutralisée par les particules électrisées qui peuvent être échangées entre l'eau et la Terre. Après tout, il s'agit d'un filet mis à la terre, car l'eau conductrice qui tombe est en contact avec l'eau du robinet, des tuyaux, du réservoir, etc. Le filet d'eau devient alors électrisé positivement du côté proche de la paille négative.⁵ Il y aura une attraction entre la paille négative et le flux positif, ce qui fera pencher l'eau vers le plastique. La figure 4.7 illustre qualitativement la distribution des charges dans le filet d'eau.

Une fois de plus, il est erroné de supposer que l'eau du robinet est un isolant. Si tel était le cas, ses molécules polaires seraient alignées par une force électrique externe. Les molécules alignées seraient alors attirées par le corps chargé externe. Mais en réalité, l'eau douce contient de nombreux sels, minéraux et impuretés qui regorgent de particules chargées électriquement, également appelées ions, comme H_3O^+ et OH^- . En présence de différences de potentiel élevées, ces ions électrisés peuvent se déplacer

⁵Sections 2.5 et 7.11 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

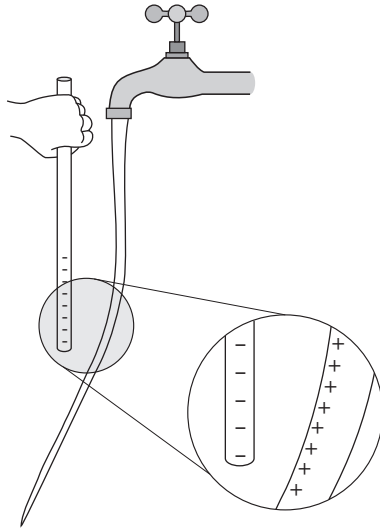


FIG. 4.7 : Électrisation du filet conducteur mis à la terre lorsqu'un corps électrisé s'en approche.

dans l'eau, de sorte que celle-ci acquiert un comportement conducteur. Une masse d'eau peut alors être polarisée de manière macroscopique lorsqu'un corps électrisé externe est approché. Lorsque ce volume d'eau est mis à la terre électriquement, il acquiert une charge nette de signe opposé à celui du corps électrisé situé à proximité. Les effets causés par cette polarisation macroscopique ou par cette charge nette accumulée dans le volume d'eau seront beaucoup plus importants que tout effet résultant uniquement de l'orientation de ses molécules polaires.⁶ L'un de ces effets peut être la courbure du filet. L'amplitude de la courbure pour un liquide conducteur comme l'eau est beaucoup plus importante que celle d'un liquide isolant comme l'huile, en supposant que les deux liquides se trouvent à la même distance de la même paille électrisée, figures 3.8 et 3.9.

Feynman, Leighton et Sands font partie des rares auteurs modernes qui considèrent l'eau du robinet comme un conducteur.⁷

4.2.3 Il est important de présenter une explication détaillée de l'attrait d'un filet d'eau

La sous-section 4.2.1 présentait l'explication des manuels scolaires relative à l'expérience de déviation d'un filet d'eau par une paille électrisée placée à proximité. Notre propre explication de cet effet a été présentée dans la sous-section 4.2.2. Notre description est très différente de celle qui figure dans les manuels scolaires habituels.

⁶Pour une discussion sur ce sujet, voir [WB11], [Jec12], [BW12a], ainsi que les sections 2.5 et 7.11 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

⁷[FLS64, pp. 8–9].

Nous considérons qu'il est important de corriger les manuels scolaires pour plusieurs raisons. Au-delà des raisons citées dans la sous-section 4.1.3, nous pouvons mentionner :

- L'expérience de l'attraction d'un filet d'eau est l'un des phénomènes électriques les plus simples, qui apparaît dans de nombreux manuels scolaires. Les manuels modernes ne devraient pas présenter une explication erronée de ce phénomène simple.
- La plupart des gens ont vu cette expérience décrite sur Internet et l'ont peut-être même réalisée eux-mêmes à la maison ou à l'école. Ils méritent une image claire et correcte de cet effet.
- Grâce à une explication correcte, nous apprenons que l'eau se comporte comme un conducteur dans les expériences électrostatiques. Il s'agit d'un aspect très important que tout le monde devrait connaître. En comprenant ce fait, nous sommes alors en mesure d'expliquer de nombreux autres phénomènes curieux liés à l'électricité. Nous prenons notamment conscience du rôle crucial de l'eau et de l'humidité dans ces expériences.

4.3 Différences entre les verres anciens et modernes

Les phénomènes électriques ont été décrits pour la première fois par les Grecs anciens, avec le célèbre effet de l'ambre, section 1.1. Au cours des XVII^e et XVIII^e siècles, on remplaçait généralement l'ambre par un tube de verre pour réaliser ces expériences. En ce qui concerne leur comportement électrique, il existe trois différences principales entre les verres anciens et modernes. Par verres anciens, nous entendons les tubes, sphères et cylindres en verre utilisés par Francis Hauksbee (vers 1666–1713), Stephen Gray (1666–1736), Charles Du Fay (1698–1739), Jean Antoine Nollet (1700–1770) et Benjamin Franklin (1706–1790), par exemple. Par verres modernes, nous entendons les types de verre courants que l'on trouve dans la vie quotidienne à la maison (par exemple, les tasses, les bouteilles, les pots alimentaires, les vitres, les miroirs, les ampoules de lampe, etc.) ou dans les magasins spécialisés (bêchers, tubes à essai, tubes de culture, lentilles, lames de microscope, prismes, etc.).

Ces différences peuvent être dues à la composition interne de ces verres et également aux processus de fabrication de ces matériaux. Gray, en particulier, a réalisé la plupart de ses expériences en électrisant un tube en verre flint, qui est un type spécial de verre contenant du plomb dans sa composition.⁸ Le verre flint a été développé par George Ravenscroft (1632–1683) vers 1662. Il est le précurseur du verre au plomb anglais, communément appelé cristal (bien qu'il s'agisse d'un matériau amorphe dépourvu de structure cristalline).

Il est important de souligner ici ces différences, non seulement en raison des aspects historiques liés aux expériences originales de ces premiers scientifiques, mais aussi en raison de leurs aspects pédagogiques et didactiques modernes. Après tout, lorsque nous essayons de reproduire certaines des premières expériences avec des

⁸[Chi54], [Hau09], [RR57, pp. 570 et 584–585], [Hom81, p. 13] et [Hei99, pp. 235–236].

verres modernes, de nombreuses activités ne fonctionnent tout simplement pas comme décrites à l'origine. Les phénomènes souhaités peuvent également se produire uniquement avec une intensité ou une amplitude très faible, c'est-à-dire avec un degré très faible qui n'est pas facilement observable ou détectable. Les trois sous-sections suivantes traitent des principales différences entre les verres anciens et modernes, en commençant par les plus pertinentes.⁹

4.3.1 Comportement conducteur ou isolant

Stephen Gray frottait son tube de verre flint à mains nues, comme il le mentionne dans son article de 1707–1708.¹⁰ Après avoir frotté le tube de verre, il le tenait dans sa main pendant les expériences. D'autres chercheurs de cette époque, tels que Hauksbee, Du Fay et Nollet, frottaient également des tubes de verre. Ces tubes étaient fabriqués avec les verres courants de l'époque. La plupart des illustrations et des peintures de cette période représentant des expériences électriques montrent les chercheurs tenant des tubes frottés à mains nues. Ces tubes n'étaient pas déchargés par mise à la terre, c'est-à-dire par contact avec les mains des scientifiques.

Ce fait signifie que les anciens tubes de verre se comportaient comme d'excellents isolants. Les tubes électrisés n'étaient pas déchargés par les mains des chercheurs mis à la terre. En revanche, de nombreux types de verre moderne commun se comportent comme de bons conducteurs pour les expériences électrostatiques. C'est la principale différence entre les verres anciens et modernes.

Le comportement conducteur de nombreux types de verres modernes est facilement vérifiable grâce à l'expérience 3.4 de la section 3.1. En effet, lorsqu'un morceau de verre tenu dans la main touche le carton d'un électroscope chargé, il se décharge rapidement. Bien que ce comportement conducteur se produise avec de nombreux types de verre moderne, certains types de verre présentent toujours un comportement isolant. La propriété conductrice ou isolante d'un morceau de verre dépend de sa constitution interne, du comportement de sa surface et de son processus de fabrication.

Il est donc difficile d'électriser de nombreux types de verre moderne en utilisant la procédure de Gray. Prenez, par exemple, un verre à la main et frottez-le dans des cheveux ou avec un mouchoir en coton. Si vous approchez ensuite ce verre frotté de morceaux de papier posés sur la table, aucune attraction ne sera observée. Même lorsqu'il y a une attraction, elle est généralement de faible intensité et difficilement perceptible. Cette absence d'attraction s'explique par le comportement conducteur du verre moderne. Quelle que soit la quantité de charge acquise lors du frottement, la majeure partie est neutralisée par les charges du sol via notre corps et nos mains, dès que le frottement cesse. Après tout, le verre est mis à la terre via la main.

Selon Bossa et ses collaborateurs, la conductivité électrique des verres peut varier considérablement en fonction de leur composition chimique.¹¹ C'est pourquoi,

⁹ [Bos11, section 2.5] et [BAC12, section 4.5, pp. 93–100]. Voir également le chapitre 1, sections 5.1 et 6.3, ainsi que l'annexe B, section B.1 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

¹⁰ [Chi54, pp. 34 et 37].

¹¹ [Bos07].

en ce qui concerne les expériences électrostatiques, il est facile de trouver aujourd'hui des verres qui se comportent comme des conducteurs et d'autres qui se comportent comme des isolants. Il est facile d'électriser par frottement des matériaux isolants tenus dans la main. Les matériaux conducteurs, au contraire, ne peuvent être électrisés par frottement que lorsqu'ils sont isolés du sol par une poignée isolante. Par conséquent, avant d'essayer de reproduire une ancienne expérience utilisant des verres modernes, testez leur comportement électrique. Ce test est très important. S'ils se comportent comme des isolants, il y a de bonnes chances de réussir à reproduire l'ancienne expérience, en obtenant des résultats similaires en tenant le tube de verre dans la main. S'ils se comportent comme des conducteurs, au contraire, le verre doit être isolé du sol avant de réaliser l'expérience. Le verre doit être fixé à une poignée isolante. La main ne doit toucher que cette poignée et non le verre, afin d'éviter toute décharge. Le tube de verre peut alors être frotté contre un autre matériau. Ensuite, ce morceau de verre frotté, électrisé et isolé peut être utilisé dans différentes expériences.

De nombreux types de verre peuvent modifier leur comportement électrique par un léger chauffage. Un morceau de verre conducteur peut devenir isolant simplement en le réchauffant au feu ou au micro-ondes.

La manipulation laisse de la condensation sur la surface du verre. Cette humidité doit être évitée en raison de la conductivité élevée de l'eau par rapport à celle du verre. Certains verres se comportent comme des conducteurs en raison de l'humidité ou de la vapeur d'eau accumulée à leur surface. Lorsque le verre est chauffé, cette eau s'évapore et ils peuvent se comporter comme des isolants. Autrement dit, cette procédure de réchauffement augmente la quantité de charge que le verre peut retenir à sa surface après avoir été frotté. Le verre est un matériau hygroscopique qui absorbe l'humidité de l'air et augmente ainsi sa conductivité.¹² La conductivité du verre dépend de sa composition et de l'état de sa surface. Le verre chaud est généralement plus isolant que le verre à température ambiante.

Un autre facteur susceptible d'augmenter les propriétés isolantes du verre est l'augmentation de sa longueur, comme indiqué dans la sous-section 3.3.4. Supposons qu'un tube de verre soit tenu par une extrémité et frotté à l'autre extrémité. Il y aura une quantité raisonnable de verre sec entre ces deux régions, ce qui se traduira par un bon degré d'isolation. De plus, les tubes plus longs ont une résistance électrique plus élevée que les tubes plus courts. Par conséquent, les tubes plus longs conserveront plus longtemps les charges acquises par frottement. Gray, en particulier, travaillait généralement avec un tube de verre d'un mètre de long.

4.3.2 Densité des charges superficielles acquises par frottement

Considérons un verre moderne qui se comporte comme un isolant en raison de sa composition chimique, de son processus de fabrication ou lorsqu'il a été préalablement chauffé. Même dans ce cas, il existe une différence importante entre ce verre et les verres anciens. Stephen Gray et d'autres scientifiques précurseurs pouvaient produire des effets considérables avec leurs tubes électrisés par friction. Ces effets étaient facilement perceptibles à grande distance. Ils pouvaient, par exemple, attirer

¹²[WB09].

des corps légers situés à 10 ou 20 cm des tubes. Ils ont également réussi à transmettre la vertu électrique ou le pouvoir d'attraction à de très longues cordes conductrices qui étaient isolées du sol. Certaines de ces cordes mesuraient plus de 100 m de long. Le tube de verre électrisé touchait une extrémité de la corde ou était maintenu à proximité de celle-ci. L'autre extrémité de la longue corde (ou un corps conducteur fixé à cette autre extrémité de la corde) pouvait alors attirer des corps légers placés à proximité, comme des feuilles de laiton. Gray a alors pu créer une forte polarisation de la corde grâce à la grande quantité de charge accumulée à la surface de son tube de verre frotté. Son tube a acquis une grande quantité de charges électriques pendant le processus de frottement. De plus, Gray pouvait facilement produire des étincelles ou des décharges électriques en approchant son tube de verre électrisé d'autres corps conducteurs.

Il est difficile de reproduire certains de ces effets avec la même intensité (ou à ces distances) en utilisant des matériaux modernes frottés manuellement. Pour réaliser ces expériences, un isolant doit être électrisé par friction. Cet isolant peut être, par exemple, un morceau de verre préalablement chauffé, une paille en plastique, une règle en acrylique ou un tube en PVC. Même lorsque nous reproduisons certains des phénomènes décrits par Gray, l'ordre de grandeur des effets observés est généralement inférieur à celui des phénomènes mentionnés par Gray. Mesurez, par exemple, la distance critique à laquelle une paille ou un tube en PVC frotté commence à attirer de petits morceaux de papier. Cette distance est généralement inférieure à la distance critique à laquelle Gray a réussi à attirer des corps légers avec son tube frotté. Nous pouvons également polariser les extrémités d'un fil métallique isolé et conducteur qui se trouve à proximité d'une règle en acrylique ou d'une paille en plastique frottée. Cependant, l'intensité de cette polarisation du fil métallique est généralement inférieure à celle des cordes obtenues par Gray qui se trouvaient à proximité de son tube en verre frotté. Placez des morceaux de papier près d'une extrémité d'un fil métallique et approchez le tube en PVC frotté de son autre extrémité. Mesurez la longueur maximale de ce fil avec laquelle il attire les morceaux de papier. Elle est généralement inférieure à la longueur des cordes de Gray attirant des corps légers lorsque son tube en verre frotté était proche de l'autre extrémité de la corde. Il est difficile aujourd'hui de produire des étincelles visibles ou des décharges électriques après avoir frotté un isolant dans la main puis l'avoir approché d'un autre corps conducteur. Même lorsque nous produisons ces étincelles, elles ne se produisent qu'à de très petites distances entre la paille en plastique électrisée et le conducteur voisin. Gray, en revanche, pouvait produire de grandes étincelles visibles avec son tube électrisé à 10 ou 20 cm d'un corps conducteur voisin.

L'explication de ce comportement différent, ou la cause de ces ordres de grandeur différents, réside dans les densités des charges superficielles acquises par frottement. Le tube de Gray était non seulement un excellent isolant, mais il pouvait également acquérir une grande densité de charge superficielle par frottement. La densité des charges qu'il obtenait est généralement beaucoup plus importante que la densité des charges superficielles obtenues aujourd'hui dans nos isolants, même lorsque nous utilisons de bons isolants comme une paille en plastique, une règle en acrylique ou un tube en PVC. Comme nous n'obtenons que de faibles quantités de charge superficielle par frottement, il est difficile de reproduire certaines expériences réalisées par Gray qui produisent des effets du même ordre de grandeur ou de la même intensité.

4.3.3 Le signe des charges acquises par le verre frotté

La troisième différence entre les verres anciens et modernes concerne le type de charges électriques acquises par le matériau lorsqu'il est frotté contre la peau humaine.¹³

Du Fay a découvert les deux types d'électricité. Il a également proposé la règle selon laquelle les corps électrisés avec des charges de même type se repoussent, tandis que les corps électrisés avec des charges de signe opposé s'attirent. Ces découvertes ont été publiées en 1733.¹⁴ Il constata que le verre, le cristal de roche, les pierres précieuses, les poils d'animaux et la laine acquéraient une électricité du premier type lorsqu'ils étaient frottés contre sa peau ou contre de la soie. L'ambre, le copal, la gomme laque, le tissu de soie, le fil et le papier, en revanche, acquéraient une électricité du second type lorsqu'ils étaient frottés contre sa peau ou contre un autre tissu de soie. Il nomma donc « électricité vitreuse » le premier type d'électricité et « électricité résineuse » le second.

Vingt ans après la publication de ces résultats, de nouveaux effets ont été découverts. On a notamment observé que le verre rugueux ou non poli pouvait être chargé de manière vitreuse en le frottant avec de la flanelle, ou de manière résineuse en le frottant avec de la soie huilée. Cet effet se produisait également avec d'autres matériaux. Autrement dit, un même matériau pouvait acquérir de l'électricité du premier ou du deuxième type, selon le matériau contre lequel il était frotté. Cette découverte a conduit à la création de ce qu'on appelle la série triboélectrique, dont les premières publications remontent à 1757 et 1759.

Dans une série triboélectrique, le symbole « + » est suivi de nombreux corps, se terminant par le symbole « - ». Lorsque le corps *I* est frotté contre le corps *II*, celui qui est chargé positivement sera le corps le plus proche du symbole « + », tandis que l'autre corps sera chargé négativement.

La terminologie de Du Fay a perdu son sens et a été remplacée par d'autres termes. Depuis lors, il a été convenu de remplacer les termes « électricité vitreuse » et « électricité résineuse » par « électricité positive » et « électricité négative », respectivement. D'autres expressions similaires utilisées aujourd'hui sont « charges électriques positives » et « charges électriques négatives », ou « corps chargés positivement » et « corps chargés négativement ».

Nous pouvons maintenant expliquer la troisième différence entre les verres anciens et modernes. Elle est liée au type d'électrisation acquis par un morceau de verre lorsqu'il est frotté contre la peau humaine. Les verres modernes sont très proches de la peau dans la série triboélectrique.¹⁵ En particulier, certains types de verre seront plus proches du symbole « + » dans une série triboélectrique que la peau humaine. Appelons ces verres *A*. D'autres types de verre seront plus proches du symbole « - » dans une série triboélectrique que la peau humaine. Appelons ces verres *B*, tableau 4.1.

Lorsque le verre *A* est frotté contre la peau, il se charge positivement. En revanche, lorsque le verre *B* est frotté contre la peau, il se charge négativement. Pour savoir si un morceau de verre spécifique est de type *A* ou *B*, frottez-le contre la peau. Testez la

¹³Sections 5.2 à 5.4 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

¹⁴[DF33b], [DF34a] et [BC07].

¹⁵Section 5.4 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

TAB. 4.1 : Série triboélectrique pour verres modernes.

+
verre de type <i>A</i>
peau humaine
verre de type <i>B</i>
-

charge acquise. Détectez, par exemple, si ce morceau de verre sera attiré ou repoussé par un autre corps préalablement chargé positivement. Des expériences de ce type nous permettront alors de classer ce morceau de verre spécifique comme étant de type *A* ou *B*.

En conclusion, les verres modernes peuvent acquérir une électrisation positive ou négative lorsqu'ils sont frottés contre la peau humaine. En revanche, les anciens verres utilisés par Gray et d'autres chercheurs de cette époque n'acquerraient généralement qu'une électrisation positive lorsqu'ils étaient frottés contre la peau.

4.3.4 Le verre dans les manuels scolaires modernes et l'importance de corriger ce qu'ils disent

La plupart des manuels scolaires modernes commencent l'étude de l'électricité par l'effet de l'ambre. L'expérience est généralement décrite avec un tube de verre remplaçant l'ambre. Ces manuels utilisent également des tubes de verre électrisés afin de présenter les deux types d'électricité, positive et négative. Dans ces deux cas, les auteurs supposent explicitement ou implicitement que le verre est un isolant pour les expériences électrostatiques.

Les figures ou les images de ces manuels modernes montrent généralement le tube frotté tenu à la main nue. Ils remplacent l'ambre par un tube de verre électrisé. Ils discutent de l'attraction des corps légers sur une table, de l'attraction et de la répulsion exercées par ce tube de verre électrisé sur un pendule électrique à proximité, de son effet sur un électroscope à proximité, etc. Nous pensons que dans la plupart des cas, les auteurs modernes se contentent de copier dans d'autres manuels les résultats « hypothétiques » de ces expériences. Autrement dit, ils n'ont probablement pas réalisé eux-mêmes ces expériences. Notre hypothèse repose sur certains détails. Tout d'abord, il n'est pas facile de trouver une tige de verre à la maison ou dans un magasin ordinaire. Quoi qu'il en soit, même si nous essayons ces expériences avec un verre ou un tube à essai, les effets décrits ne se produiront généralement pas ou ne se produiront qu'avec une amplitude très faible, difficilement perceptible à l'œil nu. Après tout, la plupart des verres modernes se comportent comme des conducteurs. Par conséquent, lorsqu'ils sont tenus dans les mains, ils ne conservent pas la charge acquise lors du frottement en raison de l'effet de mise à la terre.

Une autre expérience décrite dans de nombreux manuels scolaires concerne les deux types de charge, positive et négative. Il est parfois mentionné qu'un tube en verre

devient positif lorsqu'il est frotté avec de la soie, tandis qu'une tige en caoutchouc devient négative en raison du frottement avec un tissu acrylique. La force de répulsion entre deux tubes en verre chargés positivement est illustrée par l'un de ces tubes suspendu à un fil, tandis que l'autre tube est tenu à la main nue, figure 4.8 (a). Parfois, cette expérience « hypothétique » est également illustrée par deux tubes suspendus à des fils, figure 4.8 (b).

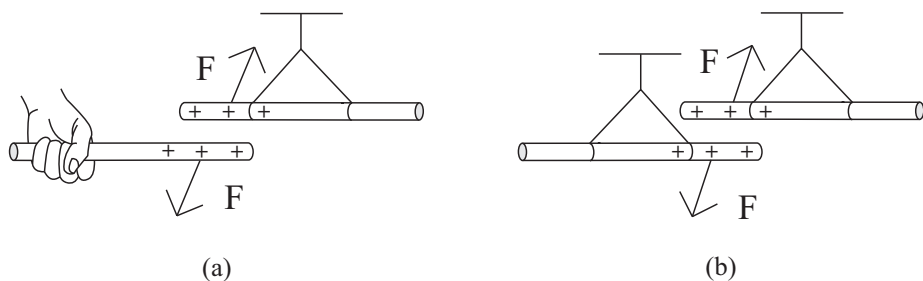


FIG. 4.8 : (a) Forces de répulsion entre un tube en verre tenu à la main nue tandis que l'autre est suspendu à un fil. (b) Forces de répulsion entre deux tubes en verre suspendus à des fils.

En remplaçant l'un des tubes en verre positifs suspendus par une tige en caoutchouc négative suspendue, les manuels illustrent les forces d'attraction entre des corps chargés de manière opposée.

Une fois de plus, les manuels scolaires supposent explicitement ou implicitement que le verre se comporte comme un isolant. Ils supposent ici que le tube de verre reste électrisé lorsqu'il est tenu à main nue. Ils font également la même supposition en supposant qu'il reste électrisé lorsqu'il est suspendu à un fil. Après tout, ils ne précisent pas le matériau de ce fil et ne discutent pas de la question de savoir si ce fil est un conducteur ou un isolant.

Si un élève tente de reproduire cette expérience avec un tube ou une tasse en verre, il ne constatera probablement aucune répulsion. La raison, comme indiqué précédemment, est que le verre moderne se comporte généralement comme un conducteur. Par conséquent, un verre frotté ne restera pas électrisé lorsqu'il est tenu à la main nue. Il ne restera pas non plus électrisé lorsqu'il est suspendu à la plupart des types de fils (coton, lin, cuivre, etc.), car ces fils se comportent comme des conducteurs. L'élève peut alors se sentir frustré. Il peut également en conclure que le problème vient de lui, à savoir qu'il n'a aucune aptitude ou compétence en physique. Il peut même perdre tout intérêt qu'il pouvait avoir auparavant pour cette matière.

De toute évidence, certains manuels présentent des expériences réelles réalisées avec des tubes en verre modernes qui produisent les effets décrits dans les figures. Dans ces cas, ils ont travaillé avec des verres électrisés isolants, même lorsqu'ils les tenaient dans leurs mains. Mais même si tel était réellement le cas, ils devraient attirer l'attention sur le fait que les expériences décrites ne fonctionneraient pas avec la plupart des verres que l'on trouve à la maison en raison de leur comportement conducteur.

En conclusion, avant de réaliser des expériences avec des verres, il est essentiel de tester au préalable s'ils se comportent comme des conducteurs ou des isolants.

4.4 Le mécanisme ACR

Le volume 1 de cet ouvrage traitait du mécanisme dit « ACR » découvert par Du Fay en 1733.¹⁶ Ce phénomène se produit généralement lorsqu'un conducteur léger, isolé électriquement du sol, est attiré par un corps électrisé. Il touche ce corps, puis en est repoussé. Parfois, le corps léger n'a pas besoin de toucher le corps électrisé, car la répulsion peut se produire après qu'ils se soient rapprochés l'un de l'autre. Heilbron a désigné par les lettres ACR cette règle simple d'attraction, de communication de l'électricité et de répulsion (c'est-à-dire Attirer, Communiquer, Repousser).¹⁷ Ces lettres A, C et R sont parfois utilisées comme provenant des mots Attraction, Contact et Répulsion.

Les expériences 4.1, 4.2 et 4.3 montrent des situations simples illustrant ce mécanisme.

Expérience 4.1 – Faire flotter quelques brins de coton

Considérons d'abord un objet tel qu'une plume de duvet ou quelques brins de coton. Il est important que l'objet choisi mette longtemps à tomber au sol dans l'air, par exemple environ 10 secondes pour parcourir une distance de 2 mètres. Il est encore mieux s'il tombe plus lentement. En revanche, s'il tombe beaucoup plus vite, il ne sera pas possible d'observer les effets décrits ici.

Frottez une paille en plastique ou une règle en acrylique dans des cheveux. Tenez la paille ou la règle en acrylique frottée à l'horizontale. Lâchez la plume de duvet ou les brins de coton un peu au-dessus de la paille. L'objet est attiré par la paille et y adhère, figures 4.9 (a) et (b).

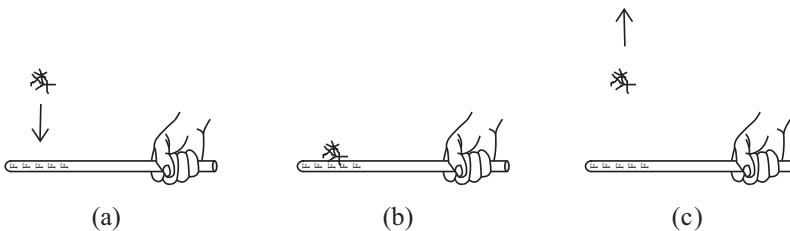


FIG. 4.9 : (a) Des brins de coton sont initialement attirés par une paille en plastique frottée. (b) Le coton touche la partie frottée de la paille. (c) Après le contact, le coton est repoussé par la paille. Il peut alors rester en suspension au-dessus de la paille malgré l'attraction gravitationnelle de la Terre!

¹⁶Sections 4.2 et 4.8 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

¹⁷[Hei99, pp. 5 et 255–258].

Si nous observons attentivement l'objet, nous pouvons voir ses brins s'étirer, comme s'ils voulaient s'éloigner de la paille. Parfois, l'objet rebondit vers le haut après le contact, s'éloignant de la paille frottée. Si cela ne se produit pas immédiatement, nous pouvons inciter l'objet à se détacher en tapotant la paille ou en soufflant doucement sur l'objet. Une fois que l'objet s'est détaché de la paille et commence à tomber, placez la paille frottée sous l'objet en chute. L'objet est alors repoussé par la paille et remonte. Parfois, cela ne se produit pas immédiatement, car l'objet doit toucher la paille frottée deux ou trois fois et être libéré après chaque contact avant de pouvoir être clairement repoussé par celle-ci. Plus la paille est électrisée, plus l'objet sera repoussé rapidement après l'avoir touchée, figure 4.9 (c).

En plaçant lentement la paille frottée sous l'objet, déplacez-le à n'importe quel endroit de la pièce. Si l'objet s'approche trop près de notre corps ou de tout autre objet dans la pièce, il est attiré vers notre corps ou cet objet et s'y colle. Pour éviter cela, utilisez la paille frottée pour éloigner l'objet de ces corps. Dans ce cas, l'objet peut facilement rester en suspension pendant un certain temps à une distance de 10 à 20 cm au-dessus de la paille, selon le degré d'électrisation de celle-ci. Pour maintenir l'objet en suspension, la paille frottée doit être maintenue en mouvement constant sous celui-ci, en suivant son mouvement, afin de guider son déplacement.

Expérience 4.2 — Faire flotter une graine de pissenlit

La figure 4.10 illustre une expérience similaire réalisée avec une graine de pissenlit. La graine de pissenlit tombe naturellement très lentement, ce qui la rend idéale pour cette expérience. Il est facile de la maintenir en suspension au-dessus d'une paille en plastique frottée avec des cheveux.

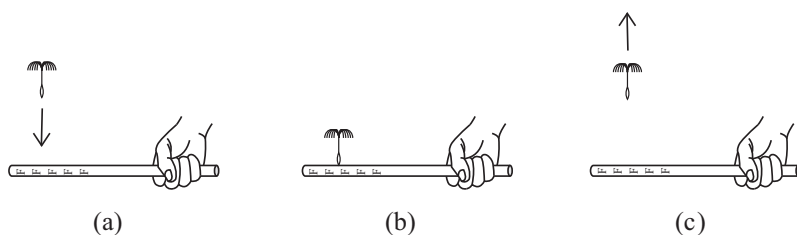


FIG. 4.10 : L'expérience 4.9 peut être facilement réalisée avec une graine de pissenlit flottant au-dessus d'une paille en plastique frottée avec des cheveux.

Avec une graine de pissenlit, la procédure est généralement plus facile qu'avec quelques brins de coton. Lorsque la graine de pissenlit est libérée dans l'air au-dessus de la paille frottée, elle est attirée par la paille, la touche et en est immédiatement repoussée.

Les expériences 4.1 et 4.2 sont très simples, mais extrêmement curieuses. Personne qui les réalise n'oublie ce qu'il ou elle voit. Otto von Guericke (1602–1686), Stephen Gray et Du Fay ont réalisé des expériences comme celles-ci. Elles ont eu une grande importance historique. Une vidéo très intéressante montrant une reproduction

moderne de la lévitation d'une fine feuille d'or a été réalisée par Blondel et Wolff,¹⁸ « La danse des feuilles d'or ».

Expérience 4.3 — *Répulsion entre un corps électrisé et le disque en papier d'un pendule électrique*

Utilisez un pendule électrique classique composé d'un petit disque en papier ou en feuille d'aluminium d'un diamètre de l'ordre de 1 ou 2 cm, attaché à l'extrémité libre inférieure d'un fil en soie, en nylon ou en polyester, figure 2.10. Électrisez une paille en plastique ou un peigne en acrylique en le frottant vigoureusement avec des cheveux, une serviette en papier ou un mouchoir en coton. Approchez-le du pendule. Le disque est attiré par la paille, la touche, puis est repoussé par celle-ci, figure 4.11.

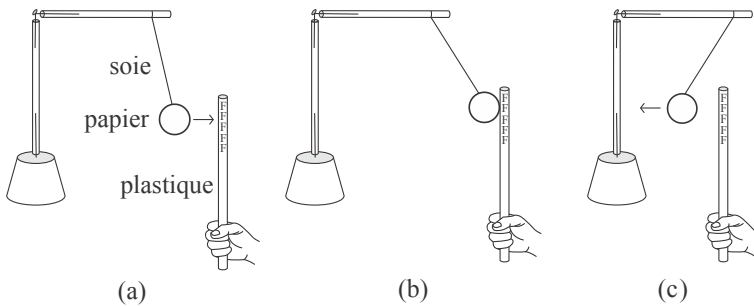


FIG. 4.11 : (a) Le disque en papier est d'abord attiré par le plastique frotté, (b) le touche, puis (c) est repoussé par la paille.

Parfois, le disque en papier n'est pas immédiatement repoussé par le plastique frotté après le contact, et reste en contact avec celui-ci pendant quelques secondes. Dans ce cas, observez la répulsion en tapotant sur la paille pour libérer le disque. Vous pouvez également déplacer la paille de haut en bas pour libérer le papier, ou souffler légèrement dessus. Une fois libéré, le disque de papier est normalement repoussé par le plastique frotté. Dans certains cas, il faut 2 ou 3 attractions du disque par la paille frottée, en laissant toujours leur contact à chaque attraction, avant de pouvoir observer leur répulsion.

Pour recommencer tout ce processus, le disque doit être déchargé. Pour cela, touchez le disque de papier avec le doigt. Il n'est pas nécessaire de tenir le disque de papier, un simple toucher suffit. Il est alors déchargé par mise à la terre. Après cette décharge, rapprochez à nouveau la paille électrisée du pendule. Le disque de papier sera à nouveau attiré par la paille. Il touchera la paille et sera repoussé par celle-ci.

4.4.1 Explication du mécanisme ACR

Il existe une explication simple à ce comportement. Nous illustrons l'explication du mécanisme ACR à l'aide de l'expérience 4.3. Supposons que la paille ou la règle

¹⁸[BW12c] et [BW12b].

en plastique soit chargée négativement et que le disque en papier soit initialement neutre lorsqu'il est éloigné du plastique. Un disque en papier ou en feuille d'aluminium se comporte comme un bon conducteur. Il est soutenu par un fil isolant en soie, en nylon ou en polyester. Lorsque la paille électrisée est approchée du disque, celui-ci se polarise. La partie du disque la plus proche de la paille frottée acquiert une charge de signe opposé à celle de la paille, tandis que la partie opposée du conducteur acquiert une charge de même signe que celle de la paille, figure 4.12 (a).

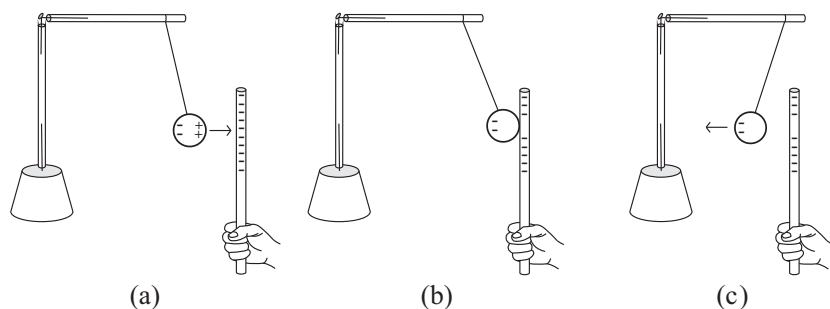


FIG. 4.12 : (a) Le disque conducteur se polarise sous l'effet d'une paille électrisée située à proximité. Il existe une attraction nette entre les deux. (b) Lors du contact, il y a un échange de particules électrisées. À la suite de cet échange, le disque se charge d'une charge nette de même signe que celle de la paille. (c) Le disque électrisé est alors repoussé par la paille.

La distance entre la partie positive du disque et la paille négative est inférieure à la distance entre la partie négative du disque et la paille. La force électrique est attractive entre des corps chargés de signes opposés et répulsive entre des corps chargés du même signe. De plus, l'intensité de ces forces augmente lorsque la distance entre les corps chargés diminue. Par conséquent, l'attraction exercée par la paille négative sur la partie positivement électrisée du disque est plus grande que la répulsion exercée sur la partie opposée du conducteur qui est négativement électrisée. Ces forces opposées de magnitudes différentes produisent une force d'attraction nette agissant sur le disque. Lorsque le disque touche la paille, il y a un échange de particules électrisées entre eux, neutralisant la partie du disque proche de la paille ainsi que les points de la paille qui ont touché le disque, figure 4.12 (b). Nous exagérons dans cette image la région neutralisée de la paille. Le plastique se comporte comme un isolant. Par conséquent, les particules négatives des autres régions électrisées de la paille ne bougent pas. Après le contact, le disque et la paille deviennent tous deux négativement électrisés. Il y a alors une répulsion nette entre eux, figure 4.12 (c).

4.4.2 Situations dans lesquelles le mécanisme ACR ne s'applique pas

Expérience 4.4 — *Attraction entre un corps électrisé et un disque en papier attaché à un fil de coton*

Répétez l'expérience 4.3 en utilisant dans ce cas un disque conducteur mis à la terre. Pour ce faire, remplacez le fil isolant par un fil conducteur attaché à un support conducteur. Le disque en papier peut alors être attaché à l'extrémité inférieure d'un fil de coton, qui est lui-même attaché à une brochette en bois ou à un fil métallique. Tenez une extrémité de la brochette avec la main, tandis que l'autre extrémité soutient le fil de coton. Cet instrument est analogue au fil pendulaire de Gray décrit dans la section 2.5.

Approchez lentement un morceau de plastique frotté près de ce pendule conducteur. Le pendule s'incline vers la paille, la touche et reste collé à la paille électrisée, figure 4.13.

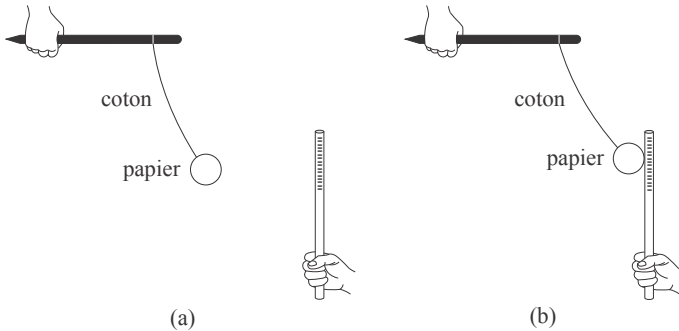


FIG. 4.13 : (a) Le disque conducteur relié à la terre est attiré par une paille électrisée. (b) Le disque touche la paille et reste collé à celle-ci après le contact.

Répétez ce processus plusieurs fois. Le mécanisme ACR ne se produit pas. Autrement dit, même lorsque le disque touche plusieurs fois la paille électrisée, le mécanisme d'attraction, de contact et de répulsion ne se produit pas.

Expérience 4.5 — *Attraction entre un corps électrisé et un disque en plastique*

Répétez l'expérience 4.3 en utilisant dans ce cas un disque isolant d'un pendule électrique en plastique de la figure 2.12.

Approchez lentement un morceau de plastique frotté du disque en plastique de ce pendule. Le pendule s'incline vers la paille, figure 4.14 (a).

Si nous laissons le disque en plastique et la paille frottée en contact, ils restent normalement collés l'un à l'autre, figure 4.14 (b).

Ces activités indiquent que pour que le mécanisme ACR se produise, le conducteur (disque en papier) doit être isolé électriquement du sol (par l'air et par un fil

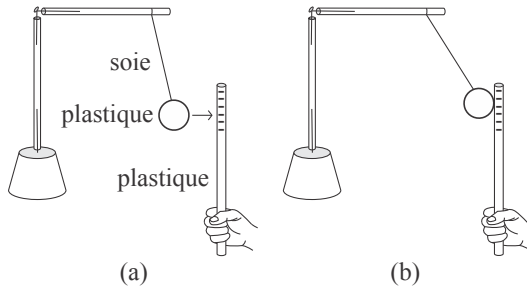


FIG. 4.14 : (a) Le disque isolant d'un pendule en plastique est attiré par une paille frottée, (b) le touche et reste collé à celui-ci.

isolant), comme c'était le cas dans l'expérience 4.3. Lorsque le conducteur est mis à la terre comme dans l'expérience 4.4, le mécanisme ACR ne se produit pas, même en permettant le contact entre le conducteur et la paille électrisée.

Ce comportement peut également s'expliquer. Observons tout d'abord que les seuls isolants dans cette dernière expérience étaient l'air et la paille en plastique électrisée. Tous les autres corps se comportaient comme des conducteurs, à savoir le disque en papier, le fil de coton, la brochette en bois et la main reliée à la terre. Supposons que la paille était électrisée négativement. Lorsqu'elle s'approche du disque, celui-ci a tendance à se polariser. Cependant, comme il s'agit d'un conducteur relié à la terre, ses particules chargées négativement sont neutralisées par la mise à la terre. Par conséquent, le disque devient chargé positivement à proximité de la paille, figure 4.15 (a).

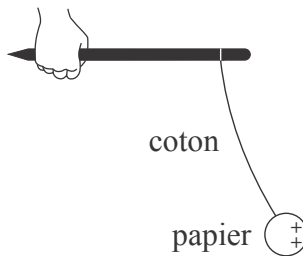


FIG. 4.15 : (a) Le disque mis à la terre s'est chargé positivement à proximité de la paille négative. (b) Le conducteur mis à la terre reste chargé positivement à proximité de la paille, étant attiré par les régions négatives de la paille isolante.

Lorsque le disque en papier touche la paille, il se produit un échange de particules électrisées entre les deux, qui tend à neutraliser le disque et les points de la paille qui l'ont touché. La paille étant un isolant, ses autres particules électrisées ne bougent pas et restent à leur place. Ces particules négatives qui sont restées dans la paille électrisée continuent d'exercer une force d'attraction sur les particules électrisées libres du disque conducteur. Ces forces d'attraction ont tendance à polariser à nouveau le disque, le laissant positif dans la zone de contact et négatif sur son côté opposé. En

raison de la mise à la terre, le côté opposé du disque devient neutre. Il ne reste que la zone positive proche de la paille négative, figure 4.15 (b). Dans cette figure, nous exagérons la zone neutre de la paille qui est en contact avec le disque.

Il convient de souligner que le mécanisme *ACR* ne se produit pas non plus pour un petit isolant qui est attiré par un corps électrisé, comme observé dans l'expérience 4.5. Le disque en plastique peut être légèrement attiré par la paille électrisée et peut même la toucher. Cependant, le disque restera collé à la paille électrisée après le contact, même après avoir répété cette procédure plusieurs fois.¹⁹

4.5 L'importance de la découverte des conducteurs et des isolants par Stephen Gray

La plus ancienne référence à ce que l'on appelle l'effet de l'ambre apparaît dans l'œuvre *Timée* de Platon (vers 428–348 av. J.-C.).²⁰ Pendant deux mille ans, peu de découvertes ont été faites dans le domaine de l'électricité. Les gens savaient essentiellement que l'ambre et quelques autres substances avaient le pouvoir d'attirer les corps légers après avoir été frottés. En 1729, Stephen Gray s'est rendu compte qu'il existait deux groupes de corps, appelés aujourd'hui conducteurs et isolants. Il a également découvert certaines des principales propriétés des conducteurs et des isolants. Il a publié ses résultats en 1731 dans l'un des ouvrages les plus importants de l'histoire de l'électricité.²¹ Le volume 1 de cet ouvrage traite en détail de l'article de Gray.²²

La découverte fondamentale de Gray a permis de contrôler les phénomènes électriques. Il a identifié le mécanisme de mise à la terre ou de mise à la masse permettant de décharger un conducteur électrisé. Il a réussi à électriser des métaux, de l'eau et le corps humain. À cette fin, ces matériaux ont été isolés du sol. Il a pu transmettre l'électricité (ou le pouvoir d'attirer les corps légers) à des endroits éloignés de l'endroit où le frottement avait lieu. À cette fin, il a utilisé des cordes et des fils conducteurs isolés du sol. Lorsqu'un tube de verre électrisé était maintenu en contact avec l'extrémité de cette corde conductrice ou à proximité de celle-ci, l'extrémité libre de la corde (ou un conducteur qui y était attaché) attirait également la lumière placée à proximité. Il fut également le premier à montrer comment stocker l'électricité, c'est-à-dire comment augmenter la durée pendant laquelle un corps reste électrisé. Il créa les premiers électrets (matériaux diélectriques avec une polarisation dipolaire électrostatique permanente, ou avec une électrisation permanente), comme indiqué dans la section 13.4. Les matériaux présentant une polarisation dipolaire permanente sont également appelés aimants électriques.²³ Il fut également l'un des premiers scientifiques à mener des expériences liées à la conservation des charges électriques.²⁴

¹⁹Section 7.6 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

²⁰[Pla52, sections 79 à 80, pp. 470–471], [Pla09, sections 79 à 80, pp. 163–165] et section 2.2 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

²¹[Gra32d], [Bos11, chapitre 6] et [BAC12, chapitre 7, pp. 127–169].

²²Annexe B de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17]. Voir également [RP13a], [RP13b], [RP13c], [Rai15], [RP15b], [RP15a] et [RP16].

²³[Net94], [Sil10b], [Sil10a], [Bos11, chapitre 8, pp. 226–248] et [BAC12, chapitre 19, pp. 373–392].

²⁴Section 6.10 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

Du Fay, suivant les traces de Gray, a reconnu la répulsion comme un phénomène électrique et a découvert le mécanisme *ACR*.²⁵ Lorsqu'il a observé une anomalie dans ce mécanisme (c'est-à-dire une situation dans laquelle cette règle ne fonctionnait pas), il a été convaincu de l'existence de deux types d'électricité, qu'il a appelés électricité vitreuse et électricité résineuse.²⁶ Jusqu'alors, on ne connaissait qu'un seul type d'électricité. Aujourd'hui, ces deux types d'électricité sont appelés respectivement électricité positive et électricité négative. D'autres expressions analogues sont « charges électriques positives et négatives » ou « corps électrisés positivement et négativement ».

Le développement de l'électricité a été vertigineux après la découverte de Gray. Ce qui a rendu possibles toutes ces nouvelles découvertes, c'est la connaissance de ces deux types de corps dans la nature, à savoir les conducteurs et les isolants, ainsi que leurs principales propriétés. Cette connaissance semble aujourd'hui triviale. Quoi qu'il en soit, c'est l'ignorance de l'existence de ces deux matériaux fondamentalement différents qui a empêché pendant deux mille ans les progrès dans l'étude de l'électricité. En 2012, nous avons publié une traduction portugaise commentée et complète des articles de Gray sur l'électricité, ainsi qu'une reproduction de ses principales expériences utilisant des matériaux peu coûteux.²⁷

²⁵Section 4.8 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

²⁶[DF33b], [DF34a] et [BC07].

²⁷[BAC12].

Chapitre 5

Électrisation de rubans adhésifs

Ce chapitre décrit des expériences relatives à un sujet curieux, à savoir l'électrisation de rubans adhésifs.¹

5.1 Comportement isolant ou conducteur du ruban

Expérience 5.1 — *Isolation sur toute sa longueur*

Commencez avec un rouleau de ruban adhésif ordinaire de 1 ou 2 cm de large. Il peut s'agir d'un ruban adhésif de bureau PSA, d'un ruban magique, d'un ruban invisible, d'un ruban collant, d'un ruban cellophane, etc. Analysez ses propriétés conductrices ou isolantes. La face adhésive ou gommeuse sera représentée par la lettre initiale G , tandis que la face lisse ou glissante sera représentée par la lettre S . Chargez d'abord un électroscope, figure 5.1 (a).

Prenez un morceau de ruban adhésif d'environ 10 à 20 cm de long. Tenez ses extrémités avec les mains. Touchez le bord de l'électroscope chargé avec la face lisse. La bande de l'électroscope reste soulevée, figure 5.1 (b). Le même phénomène se produit lorsque la face adhésive du ruban touche le bord d'un électroscope chargé, figure 5.1 (c).

Cette expérience montre que les deux faces d'un ruban adhésif se comportent comme des isolants sur toute leur longueur. Bien que le ruban soit relié à la terre par la main, l'électroscope ne se décharge pas.

Expérience 5.2 — *Le ruban conducteur par sa face*

Recommencez l'expérience avec un électroscope chargé, figure 5.2 (a).

Tenez un ruban adhésif par les deux extrémités. Touchez le centre de la face lisse du ruban adhésif sur le bord de l'électroscope. Sa bande reste relevée, figure 5.2 (b).

¹ [Jef59], [Bea96], [CS02, chapitre 14], [Mor04b], [Mor04a] et [Vas05].

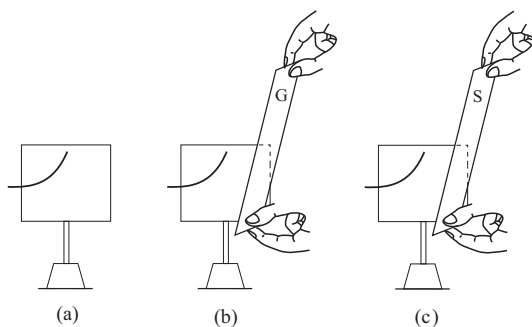


FIG. 5.1 : (a) Électroscope chargé. (b) La face lisse d'un ruban adhésif touche le bord de l'électroscope. La bande reste relevée. (c) Elle reste également relevée lorsque la face adhésive du ruban touche le carton.

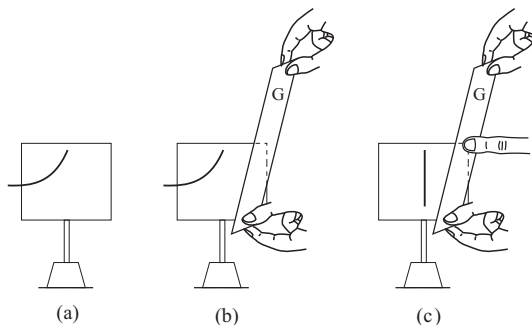


FIG. 5.2 : (a) Électroscope chargé. (b) La face lisse du ruban touche le bord du carton et la bande reste relevée. (c) Un doigt touche l'autre face du ruban et la bande retombe.

Une autre personne touche ensuite du doigt le centre de l'autre face du ruban. Le ruban doit rester entre le bord du carton et le doigt. Le doigt ne doit pas toucher le carton. Dans ce cas, la bande retombe en quelques secondes, figure 5.2 (c).

La bande d'un électroscope chargé tombe également lorsque la face adhésive du ruban touche le bord du carton et qu'un doigt touche la face lisse du ruban.

L'électroscope se décharge alors lorsqu'une face du ruban adhésif touche le bord du carton et qu'un doigt touche l'autre face du ruban. Par conséquent, la face d'un ruban adhésif se comporte comme un conducteur pour les expériences électrostatiques, bien que le ruban se comporte comme un isolant sur toute sa longueur.

Expérience 5.3 — Plusieurs rubans superposés

Superposez plusieurs couches de ruban adhésif en superposant des rubans de même longueur. Collez un ruban adhésif initial de 10 à 20 cm de long sur la surface d'un bureau. Collez par-dessus autant de couches que vous le souhaitez, toutes de même longueur. Répétez ensuite l'expérience 5.2 avec ce ruban multicouche.

Touchez une face du ruban multicouche sur le bord d'un électroscope chargé. Un doigt touche ensuite la face opposée de ce ruban multicouche. Mesurez l'intervalle de temps nécessaire pour décharger l'électroscope. Le tableau 5.1 présente un résultat typique.

TAB. 5.1 : Intervalles approximatifs pour décharger l'électroscope.

Nombre de couches qui se chevauchent	Intervalle de décharge
1	1–5 s
5	5 s
10	10 s
15	15–20 s
20	25–60 s

Selon la définition 3.5, nous concluons alors que 20 couches superposées d'un ruban peuvent être considérées comme un isolant dans une direction orthogonale à ces couches. Cette situation est représentée dans la figure 5.3.

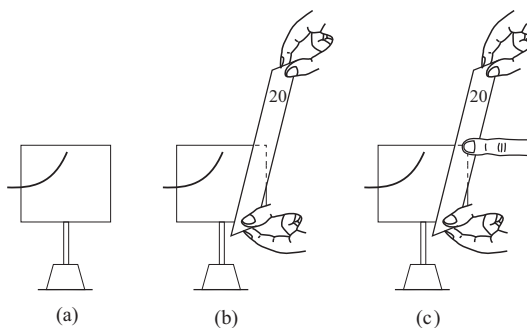


FIG. 5.3 : (a) Électroscope chargé. (b) Une face d'un ruban avec 20 couches touche le bord du carton et la bande reste relevée. (c) La bande reste relevée lorsqu'un doigt touche la face extérieure de ce ruban multicouche.

Cette expérience illustre une fois de plus le sujet abordé dans la sous-section 3.3.4. En effet, les propriétés conductrices ou isolantes d'un corps dépendent non seulement de sa nature, mais aussi de sa longueur ou de son épaisseur. Dans la présente expérience, plus le ruban multicouche est épais, plus il se comporte comme un isolant.

Expérience 5.4 — Autres types de ruban adhésif

Répétez les expériences 5.1 et 5.2 avec d'autres types de ruban adhésif.

Un ruban chirurgical ou médical, par exemple, se comporte comme un conducteur non seulement sur sa face, mais aussi sur toute sa longueur. Alors qu'un ruban adhésif de bureau normal est fabriqué à partir d'un matériau plastique isolant, un ruban chirurgical est généralement fabriqué à partir de coton, un matériau conducteur.

Un ruban électrique (également appelé ruban isolant), en revanche, se comporte comme la plupart des rubans adhésifs. C'est-à-dire qu'il est isolant sur toute sa longueur et conducteur sur sa face. Sa couleur standard est le noir. Il est composé de vinyle ou de PVC.

En augmentant le nombre de couches superposées de ruban isolant, nous augmentons également son comportement isolant orthogonalement à ses faces. Un ruban comportant 15 ou 20 couches peut être considéré comme un bon isolant à travers sa profondeur, comme l'illustre la figure 5.3.

Expérience 5.5 — Comportement isolant sur toute sa longueur pour les basses tensions

Le comportement du ruban isolant dans l'expérience 5.4 peut surprendre beaucoup de gens. Après tout, ce ruban est généralement appelé « ruban isolant ». Cependant, à travers sa face, il se comporte comme un conducteur dans les expériences électrostatiques (l'électroscope se décharge à travers sa face). Nous réalisons deux nouvelles expériences afin de comprendre cette nomenclature.

Répétez l'expérience 3.9. L'ampoule s'allume lorsque les extrémités conductrices *A* et *B* sont directement connectées l'une à l'autre, figure 5.4 (a). Il en va de même lorsque *A* et *B* sont connectées par un fil métallique.

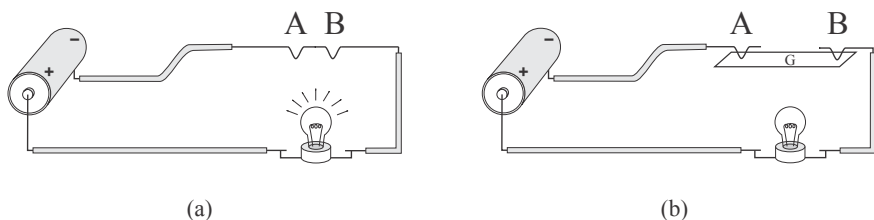


FIG. 5.4 : (a) L'ampoule s'allume lorsque les conducteurs *A* et *B* se touchent. (b) L'ampoule ne s'allume pas lorsque *A* et *B*, séparés de 2 ou 5 cm, touchent deux points centraux sur la face adhésive du ruban.

Placez maintenant un ruban adhésif de 2 à 5 cm de long entre les points conducteurs *A* et *B*, ces points touchant le centre de la face adhésive de ce ruban. Le ruban adhésif, le ruban chirurgical et le ruban isolant se comportent comme des isolants dans cette expérience, comme le montre la figure 5.4 (b). Il en va de même lorsque *A* et *B* touchent deux points de la face lisse du ruban adhésif séparés par 2 ou 5 cm.

Tous ces rubans adhésifs se comportent comme des isolants sur toute leur longueur pour les basses tensions.

Expérience 5.6 — Comportement isolant par ses faces pour les basses tensions

Testez le comportement de ces rubans sur leurs faces. Commencez par connecter directement *A* et *B* afin de vérifier que la lampe s'allume et que toutes les connexions électriques ont été correctement effectuées, figure 5.5 (a).

Placez ensuite un morceau de ruban adhésif dans un plan vertical, le point *A* touchant le centre d'une face de ce ruban et le point *B* touchant le centre de l'autre face de

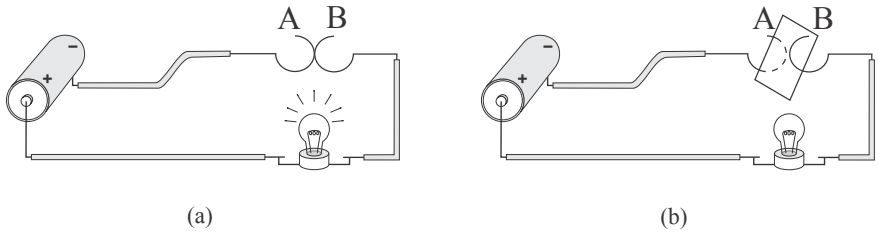


FIG. 5.5 : (a) L'ampoule s'allume lorsque les conducteurs A et B se touchent. (b) L'ampoule ne s'allume pas lorsque A touche une face du ruban adhésif et B touche l'autre face.

ce ruban. L'ampoule ne s'allume pas pour tous les types de ruban (adhésif, chirurgical ou électrique), figure 5.5 (b).

L'expérience 5.4 montre que le ruban électrique se comporte comme un conducteur à travers sa face dans les phénomènes électrostatiques où il existe une différence de potentiel de 1 000 V ou plus entre les deux faces du ruban. L'expérience 5.6, en revanche, montre que le ruban électrique se comporte comme un isolant à travers ses faces pour des tensions faibles de quelques volts. Ce ruban est également un bon isolant lorsque la tension à travers sa face atteint environ 300 V. C'est pourquoi il a reçu le nom de ruban « isolant » ou « électrique ».

Ces expériences illustrent également le sujet abordé dans la sous-section 3.3.2. En effet, le comportement conducteur ou isolant d'un corps dépend non seulement des propriétés intrinsèques de ce corps, mais aussi de la différence de potentiel externe appliquée à ce corps.

5.2 Électrisation du ruban

Afin d'uniformiser les expériences et leurs résultats, le ruban à tester doit toujours être retiré d'un autre ruban situé en dessous, appelé « ruban de base » et représenté par la lettre B . Collez le ruban adhésif de base de 10 à 20 cm de long sur une surface plane et lisse d'une table. Ce ruban de base doit être lissé avec le doigt. Un autre ruban de même longueur doit être collé sur le ruban de base. Il sera appelé « ruban supérieur » et représenté par la lettre U , figure 5.6.

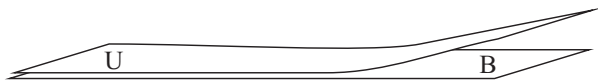


FIG. 5.6 : Ruban supérieur U au-dessus du ruban de base B .

Pliez une extrémité pour faciliter la manipulation. Le ruban supérieur doit également être lissé avec le doigt.

Expérience 5.7 — *Ruban adhésif attirant les corps légers*

Un électroscope déchargé est posé sur la table, figure 5.7 (a).

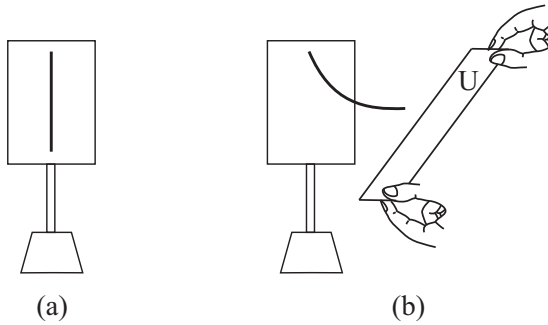


FIG. 5.7 : (a) Électroscope déchargé. (b) Ruban supérieur U attirant la bande de l'électroscope.

Les rubans B et U doivent être préparés, figure 5.6. Tenez l'extrémité pliée du ruban supérieur et tirez-le *rapidement* vers le haut pour le détacher du ruban de base. Le ruban de base doit rester collé à la table. Tenez le ruban U par ses extrémités et approchez-le de la partie inférieure de la bande de papier de soie de l'électroscope. La bande est attirée par le ruban, figure 5.7 (b).

Ce ruban supérieur oriente également un versorium métallique lorsqu'il est approché de celui-ci. Tenez le ruban verticalement par ses extrémités et déplacez-le près d'une des pattes du versorium. Le versorium tournera, pointant sa patte la plus proche vers le ruban. Lorsque le ruban est déplacé autour du versorium, celui-ci tourne en suivant la position du ruban.

Cette expérience montre que le ruban supérieur s'est électrisé lorsqu'il a été rapidement retiré du ruban de base. Ces phénomènes d'attraction sont analogues à l'effet de l'ambre, section 1.1. Cette expérience illustre également que le ruban se comporte comme un isolant sur toute sa longueur. Après tout, bien qu'il soit relié à la terre lorsqu'il est tenu dans les mains, il ne s'est pas déchargé.

Expérience 5.8 — *Ruban adhésif attiré par des conducteurs initialement neutres*

Retirez *rapidement* un autre ruban U du ruban de base. Accrochez l'une de ses extrémités à un crayon, un stylo ou au bord d'une table. Le ruban doit pendre verticalement, figure 5.8 (a) et (b).

Approchez un doigt de la partie inférieure du ruban adhésif suspendu, dans une direction orthogonale au plan du ruban. Le ruban est attiré par le doigt, figure 5.8 (c). Le ruban ne doit pas toucher le doigt. Cette attraction se produit non seulement lorsque le doigt s'approche de la face adhésive G du ruban, mais également lorsqu'il s'approche de la face lisse S .

Cette expérience montre également que le ruban adhésif s'est électrisé lorsqu'il a été rapidement retiré de ruban de base. Ce phénomène est l'opposé de l'effet de

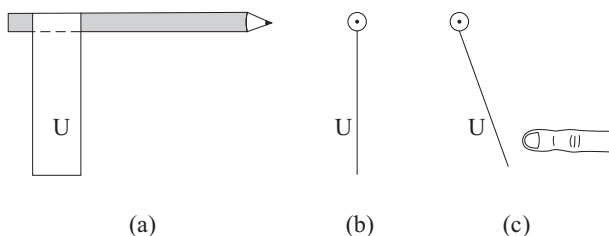


FIG. 5.8 : (a) Vue latérale d'un ruban supérieur suspendu. (b) Vue de face. (c) Le ruban est attiré par un doigt proche.

l'ambre. Il illustre le principe d'action et de réaction.² Dans l'effet de l'ambre, un corps électrisé attire des objets légers qui étaient initialement neutres. L'attraction est forte lorsque ces objets légers se comportent comme des conducteurs. Dans le phénomène inverse observé ici, un corps initialement neutre (le doigt) attire les objets électrisés (comme le ruban U suspendu) qui se trouvent à proximité. Lorsque l'attraction se produit, le doigt n'est plus neutre. Il a désormais une charge électrique de signe opposé à celle du ruban électrisé.

Essayez les expériences 5.7 et 5.8 avec différents types ou marques de rubans adhésifs, en utilisant toujours le même type de ruban pour chaque paire BU . Le type ou la marque qui devient le plus électrisé doit être utilisé dans les expériences suivantes.

Ces expériences fonctionnent bien par temps sec.

Le ruban supérieur s'est probablement électrisé sur la face adhésive G lorsqu'il a été retiré du ruban de base. Après tout, avant d'être retiré du ruban de base, il avait été lissé avec un doigt conducteur.

Les expériences de la section 5.1 ont démontré qu'un ruban adhésif se comporte comme un conducteur à travers sa face. Par conséquent, après avoir été retiré du ruban de base, un échange de particules électrisées peut avoir lieu entre les faces adhésive et lisse du ruban supérieur chargé. Il peut arriver que quelques secondes après avoir été retiré du ruban de base, les deux faces du ruban supérieur deviennent également électrisés. Quoi qu'il en soit, nous ne testerons pas dans cet ouvrage si le ruban s'est électrisé uniquement sur la face adhésive ou sur les deux faces.

Expérience 5.9 — Découverte du signe des charges sur le ruban électrisé

Électrisez deux électroscopes avec des charges opposées. Cette électrisation opposée peut être obtenue par induction, par exemple.³ Ces électroscopes chargés doivent rester sur une table, séparés l'un de l'autre, avec des bandes relevées. Notez lequel est chargé positivement et lequel est chargé négativement.

Tirez *rapidement* un autre ruban U vers le haut et hors du ruban de base B . Tenez-le horizontalement par ses extrémités et approchez-le de la partie inférieure des bandes des deux électroscopes, sans les toucher. Il attire une bande et repousse

²Section 3.5 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

³Section 7.5 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

l'autre. En connaissant le signe de la charge des électroscopes électrisés, déterminez le signe des charges sur le ruban U . Dans la majorité des expériences que nous avons réalisées, la plupart des marques ont produit des rubans supérieurs électrisés « négativement ». Ces rubans ont repoussé la bande de l'électroscope négatif et attiré la bande de l'électroscope positif.

Selon la marque du ruban adhésif, le ruban supérieur peut devenir positivement électrisé.

5.3 Neutralisation du ruban

Cette section décrit comment neutraliser un ruban électrisé.

Expérience 5.10 — Décharge du ruban au fil du temps

Supposons qu'un ruban supérieur se soit électrisé comme décrit dans la section 5.2. Suspendez-le verticalement à un support approprié, figure 5.8 (a) et (b).

La manière la plus simple de le décharger est de laisser le ruban suspendu au repos pendant quelques minutes à l'air libre. Ensuite, lorsqu'on approche un doigt de la partie inférieure du ruban, celui-ci n'attire plus le doigt. De même, lorsque ce ruban est approché de la partie inférieure d'une bande appartenant à un électroscope déchargé, la bande n'est plus attirée par le ruban. De même, un versorium métallique n'est pas orienté par ce ruban.

Expérience 5.11 — Décharger le ruban par sa face lisse

Nous présentons maintenant une autre procédure pour décharger un ruban supérieur. Tirez un nouveau ruban U vers le haut et retirez-le du ruban B . Suspendez-le verticalement au bord d'une table ou à un crayon, comme dans la figure 5.8 (a) et (b). Tenez le bas du ruban et frottez lentement un doigt avec un mouvement va-et-vient sur la face lisse du ruban, figure 5.9.

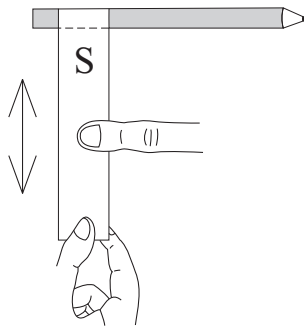


FIG. 5.9 : Frotter la face lisse du ruban adhésif.

Testez ensuite son électrisation comme dans les expériences 5.7 et 5.8. Normalement, ce ruban n'attire plus la bande d'un électroscope déchargé, il n'oriente pas un

versorium et n'est pas attiré par un doigt.

Expérience 5.12 — *Il est difficile de décharger le ruban adhésif par sa face adhésive*

Recommencez l'expérience avec un ruban électrisé suspendu. Répétez la procédure de l'expérience 5.11, mais cette fois-ci, frottez le doigt le long de la face adhésive G du ruban. Testez ensuite son électrisation comme dans les expériences 5.7 et 5.8. Observez que cette fois, le ruban reste électrisé.

Les expériences 5.11 et 5.12 sont un peu surprenantes. Après tout, le ruban U aurait dû être initialement électrisé sur la face adhésive lorsqu'il a été retiré du ruban de base. On pourrait donc s'attendre à le décharger en frottant un doigt le long du côté G . Cependant, la neutralisation n'a pas lieu dans ce cas. L'une des raisons pour lesquelles elle est restée électrisée pourrait être liée à l'adhésif lui-même, qui empêche le doigt de glisser facilement le long du côté G . Par conséquent, nous ne pouvons ni toucher ni mettre à la terre tous les points le long de ce côté du ruban. Peut-être qu'elle n'est neutralisée qu'aux quelques points où le doigt touche l'adhésif, restant électrisée aux autres points. De plus, le doigt qui se sépare de la colle peut recharger le ruban.

L'expérience 5.11, en revanche, a montré qu'il est possible de le décharger en faisant glisser un doigt le long du côté lisse du ruban. L'une des raisons pour lesquelles cette neutralisation se produit dans ce cas est liée à l'expérience 5.2, qui a montré que le ruban se comporte comme un conducteur sur son côté. Par conséquent, en faisant glisser un doigt conducteur le long du côté lisse, les particules électrisées situées des deux côtés du ruban sont neutralisées. De plus, le doigt peut glisser sur toute la surface du côté lisse, touchant la plupart des points du ruban. Cette mise à la terre générale n'a pas eu lieu sur la face adhésive, car l'adhésif a empêché le mouvement de glissement du doigt.

Expérience 5.13 — *Décharger la moitié d'un ruban*

Préparez un nouveau ruban électrisé U d'environ 20 cm de long. Suspendez-le par une extrémité et frottez lentement votre doigt sur sa face lisse, comme dans la figure 5.9, mais uniquement sur la moitié inférieure du ruban. Retirez votre doigt.

Rapprochez à nouveau votre doigt du centre de la partie frottée du ruban, à environ 5 cm de l'extrémité libre inférieure. Le ruban n'est plus attiré par le doigt. Le ruban peut également être tenu à l'horizontale. Lorsque le centre de la partie frottée du ruban est rapproché de l'extrémité inférieure de la bande d'un électroscope déchargé, aucune attraction ne se produit. Cette partie frottée du ruban n'interagit pas non plus avec un versorium métallique situé à proximité.

Approchez le centre de la partie non frottée de ce ruban de l'extrémité inférieure de la bande d'un électroscope déchargé. La bande est attirée par le ruban. Cette partie du ruban oriente également un versorium situé à proximité. Suspendez à nouveau le ruban par son autre extrémité, cette fois avec la partie frottée vers le haut. Approchez un doigt du centre de la partie inférieure du ruban qui n'a pas été frottée. Cette partie non frottée du ruban est attirée par le doigt.

Cette expérience démontre plusieurs faits. Nous avons commencé avec un ruban électrisé sur toute sa longueur et nous n'en avons frotté que la moitié. En faisant glisser

un doigt sur le côté lisse de ce ruban électrisé, nous avons neutralisé cette région. L'autre moitié du ruban sur laquelle le doigt n'a pas glissé n'a pas été déchargée. Ce fait montre à nouveau que le ruban adhésif se comporte comme un isolant sur toute sa longueur. Autrement dit, seule la moitié du ruban reste électrisée sur toute sa longueur. Les particules électrisées de cette partie ne peuvent pas se déplacer longitudinalement vers l'autre moitié du ruban.

5.4 Électrisant des rubans avec des charges opposées

Préparez un autre ensemble de rubans adhésifs, cette fois-ci avec trois rubans superposés. Le ruban inférieur B doit mesurer entre 10 et 20 cm de long et être collé sur une surface lisse et plane. Lissez-le avec le doigt. Collez un deuxième ruban adhésif sur la bande inférieure. Pliez une extrémité et lissez ce deuxième ruban sur toute sa longueur. Collez un troisième ruban sur le deuxième ruban. Pliez une extrémité et lissez ce troisième ruban sur toute sa longueur. Le deuxième ruban est appelé ruban inférieur et représenté par la lettre L qui doit être inscrite à son extrémité. Le troisième ruban est appelée ruban supérieur et représenté par la lettre U qui doit être inscrite à son extrémité. Les extrémités pliées des bandes L et U doivent être superposées. La figure 5.10 illustre cet ensemble de 3 rubans.



FIG. 5.10 : Le ruban U se trouve au-dessus du ruban L , qui se trouve lui-même au-dessus du ruban B .

Expérience 5.14 — Neutralité d'une paire de rubans superposés

Les rubans U et L doivent être soulevés *lentement* ensemble et retirés du ruban de base. Le ruban B doit rester collé à la table. Suspendez la double couche de ruban verticalement à un support approprié. Passez cette double couche plusieurs fois entre deux doigts afin de décharger la paire.

Rapprochez ensuite cette paire de rubans LU du ruban d'un électroscope déchargé. La bande n'est pas attirée, figure 5.11.

Suspendez la paire de rubans LU verticalement à un support approprié, figure 5.12 (a) et (b). Approchez un doigt de la partie inférieure de cette paire. Aucune attraction ne se produit, figure 5.12 (c).

Parfois, après avoir été soulevée et retirée du ruban de base, puis lissée entre deux doigts, la paire attire la bande d'un électroscope déchargé et est attirée par un autre doigt. Si ces interactions se produisent, la paire doit être neutralisée avant de poursuivre les expériences. Pour neutraliser la paire, suspendez-la verticalement et attendez quelques minutes. Vous pouvez également la passer lentement plusieurs fois entre deux doigts. La paire peut également être suspendue verticalement par une extrémité

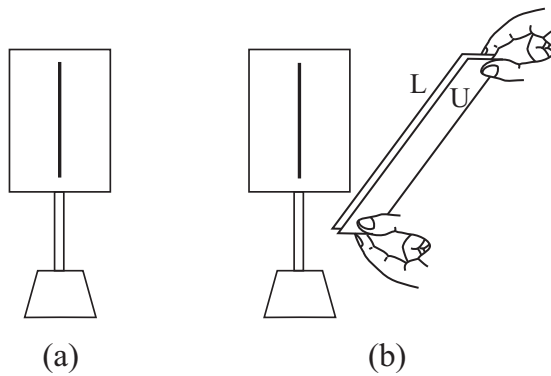


FIG. 5.11 : (a) Électroscope déchargé. (b) La paire de rubans neutres LU n'attire pas la bande d'un électroscope déchargé.

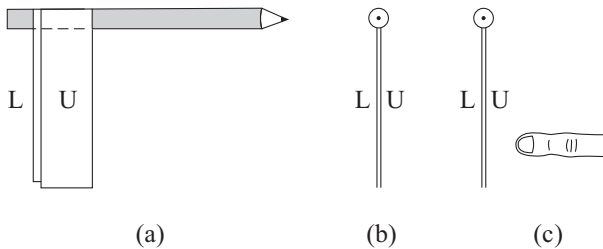


FIG. 5.12 : (a) Vue latérale d'une paire de rubans adhésifs LU suspendus. (b) Vue de face. (c) La paire n'est pas attirée par un doigt à proximité.

à un support approprié. Frottez lentement un doigt d'avant en arrière le long du côté lisse du ruban U , comme le montre la figure 5.9.

À partir de maintenant, supposez que la paire LU est neutre. Autrement dit, elle n'attire plus les corps légers et n'est pas attirée par les conducteurs mis à la terre.

Expérience 5.15 – Attraction et répulsion entre des rubans électrisés

Commencez avec une paire de rubans neutres LU , comme dans l'expérience 5.14. Tenez l'extrémité pliée du ruban L d'une main et l'extrémité pliée du ruban U de l'autre main. Puis tirez *rapidement* le ruban U vers le haut pour le détacher du ruban L . Suspendez chaque ruban verticalement à un support approprié, les deux supports étant séparés l'un de l'autre.

Vérifiez que chaque ruban s'est électrisé en effectuant des procédures analogues à celles des expériences 5.7 et 5.8.

Suivez la même procédure avec une nouvelle paire de rubans neutres LU et préparez un autre ruban L électrisé et un autre ruban U électrisé.

Approchez latéralement un crayon horizontal de l'autre crayon, chaque crayon portant un ruban U . Les crayons peuvent même se toucher. Observez que les rubans

se repoussent, figure 5.13 (a). Deux rubans L électrisés se repoussent également, figure 5.13 (b). Cependant, un ruban inférieur attire un ruban supérieur, figure 5.13 (c).

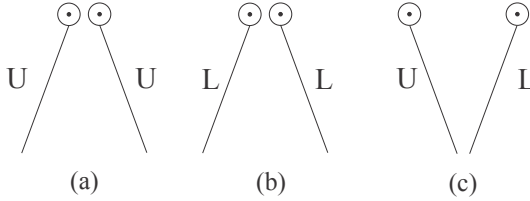


FIG. 5.13 : (a) Répulsion entre deux rubans U . (b) Répulsion entre deux rubans L . (c) Attraction entre un ruban inférieur et un ruban supérieur.

Concluez que les rubans U et L sont désormais électrisés de manière opposée, l'un positivement et l'autre négativement.

En réduisant la distance entre les crayons horizontaux portant les rubans U , on augmente l'angle d'inclinaison des rubans par rapport à la verticale. Ce fait illustre que la force de répulsion entre des corps électrisés avec des charges de même signe augmente lorsque la distance entre les corps en interaction diminue. Il en va de même en réduisant la distance entre deux rubans L , ou entre un ruban inférieur et un ruban supérieur.

Expérience 5.16 — *Découverte du signe de la charge sur chaque ruban*

Accrochez un ruban inférieur électrisé verticalement à un support approprié et un ruban supérieur électrisé à un autre support approprié. Ces deux supports doivent être séparés l'un de l'autre. Frottez une paille en plastique dans des cheveux ou avec un morceau de papier afin qu'elle se charge en électricité négative. Approchez-la horizontalement de la partie inférieure des deux rubans. Dans la plupart des rubans avec lesquels nous avons travaillé, le ruban supérieur était repoussé par la paille tandis que le ruban inférieur était attiré par celle-ci.

Une paille acquiert une charge positive suffisante lorsqu'elle est frottée entre deux tubes en PVC.⁴ Approchez cette paille positive des deux rubans électrisés. Elle repousse le ruban inférieur et attire le ruban supérieur.

Vous pouvez alors conclure que, normalement, le ruban supérieur devient électrisé négativement, tandis que le ruban inférieur devient électrisé positivement, figure 5.14.

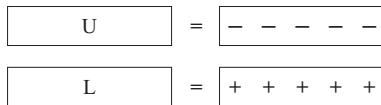


FIG. 5.14 : Le ruban supérieur est chargé négativement et le ruban inférieur est chargé positivement.

⁴Section 5.3 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

5.5 Dipôles électriques

Un dipôle électrique est constitué de deux particules égales et opposées électriquement, séparées par une certaine distance. Un corps dont la charge totale est nulle et qui possède une quantité égale de charges positives et négatives séparées le long de son volume est également appelé dipôle électrique. Dans cette section, nous montrons comment fabriquer des dipôles électriques et présentons certains phénomènes qui peuvent être observés avec ceux-ci. L'interaction entre deux dipôles électriques présente de nombreuses propriétés analogues à l'interaction entre deux aimants.

Expérience 5.17 — Dipôle électrique réalisé avec des rubans adhésifs

Préparez maintenant un dipôle électrique en commençant par un versorium en plastique, comme décrit dans la sous-section 2.3.3. Supposons que chaque patte de ce versorium mesure environ 5 cm de long. Supposons également que les deux pattes soient initialement neutres. Ce fait peut être vérifié en approchant un doigt de chaque patte. Si le versorium n'est pas orienté par le doigt, les pattes peuvent être considérées comme neutres. Préparez un ensemble de 3 rubans superposés (appelés B , L et U), comme dans la figure 5.10, chacun mesurant 4 cm de long. Les rubans L et U sont ensuite électrisés de manière opposée, comme dans l'expérience 5.15. Collez le ruban L sur une patte du versorium et le ruban U sur l'autre patte, figure 5.15 (a).

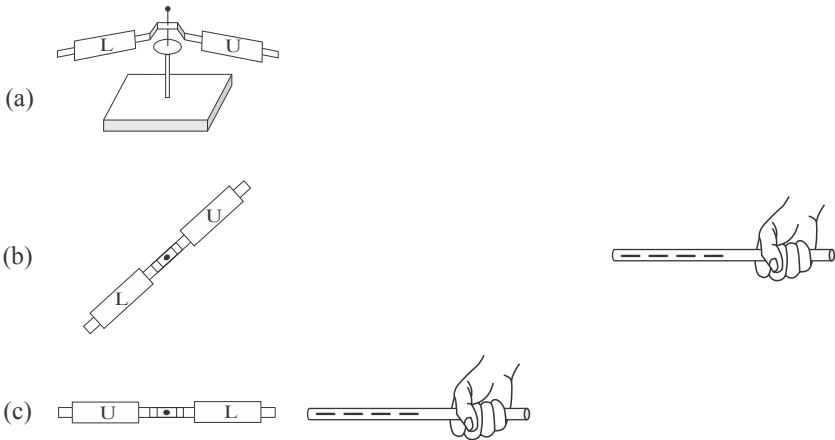


FIG. 5.15 : (a) Versorium en plastique avec un ruban électrisé L sur une patte et un ruban électrisé U sur l'autre patte. (b) Vue de dessus avec le versorium dans une orientation arbitraire lorsque la paille électrisée est éloignée de celui-ci. (c) Le versorium est orienté vers la paille électrisée qui est placée à proximité.

Lorsque la paille négative est approchée d'une des pattes, le versorium pivote et pointe vers la paille. De plus, la patte U est repoussée par la paille tandis que la patte L est attirée par celle-ci. En équilibre, le versorium est orienté comme indiqué dans la figure 5.15 (c).

Ce dipôle électrique a des charges opposées de même magnitude dans les différentes pattes du versorium. Il est analogue à une boussole magnétique ordinaire et peut être appelé une « boussole électrique ». ⁵ L'interaction entre deux versoria en plastique polarisés se comporte comme l'interaction entre deux boussoles magnétiques.

Cependant, alors qu'une boussole ordinaire est orientée par la Terre et par un aimant proche, ce dipôle électrique est orienté non seulement par un autre dipôle électrique, mais aussi par une paille électrisée avec un seul type de charge (positive ou négative). Il n'existe pas d'aimant similaire à une paille électrisée. En d'autres termes, nous ne connaissons aucun matériau dans la nature contenant un seul type de « charge magnétique ». Par exemple, il n'existe aucune substance contenant uniquement un pôle nord. Lorsque nous cassons un aimant droit en deux, chaque moitié possède un pôle nord et un pôle sud, figure 5.16.



FIG. 5.16 : (a) Aimant droit. (b) En cassant l'aimant, nous formons deux nouveaux aimants. Chaque petit aimant possède un pôle nord et un pôle sud.

Cette expérience ne fonctionne pas correctement lorsque les rubans adhésifs sont fixés sur un versorium métallique. Il y a deux raisons à cela. (a) La première raison est que ce versorium est un conducteur. Le ruban adhésif se comporte également comme un conducteur à travers sa face. Par conséquent, les particules électrisées sur les deux rubans peuvent se neutraliser mutuellement à travers le versorium conducteur.

(b) Il existe une deuxième raison qui rend la réalisation de cette expérience difficile avec un versorium métallique (même lorsque cette neutralisation n'a pas lieu, les deux rubans conservant leurs charges opposées). Un versorium métallique est un conducteur. Par conséquent, lorsqu'une paille électrisée est approchée de l'une de ses pattes, cette patte acquiert une charge induite de signe opposé. Elle sera alors attirée par la paille, essayant d'orienter le versorium. Il y aura une forte force d'attraction entre cette patte et la paille. Finalement, cette force d'attraction peut être plus importante que la force agissant entre chaque ruban et la paille. Si cela se produit, les deux pattes du versorium seront attirées par la paille, mais avec des forces totales d'intensités différentes. Supposons, par exemple, que la paille soit négative, que le ruban adhésif sur la patte gauche soit positif et que celui sur la patte droite soit négatif. Lorsque la paille est approchée de la patte gauche, l'extrémité de cette patte devient positive. La paille attire donc cette patte métallique ainsi que le ruban adhésif qui y est fixé. Approchez la paille de la patte droite. L'extrémité de cette patte deviendra également positive. La paille attirera alors cette patte métallique en raison des charges induites sur celle-ci, tandis qu'elle repoussera le ruban négatif qui y est fixé. La force d'attraction totale agissant sur la patte gauche sera supérieure à la force d'attraction résultante agissant sur la patte droite, en supposant que la distance entre la paille et chaque patte soit

⁵[Net94] et [CS02, p. 466].

la même. Ce fait compliquera quelque peu l'analyse de la rotation de ce versorium métallique.

Expérience 5.18 — Autres types de dipôles électriques

L'expérience 5.17 utilisait un dipôle électrique fabriqué à partir de rubans adhésifs. La présente expérience décrit d'autres types de dipôles électriques.

La série triboélectrique, tableau 1.1, montre qu'une paille en plastique se charge négativement lorsqu'elle est frottée dans des cheveux, sur la peau ou avec du papier ou du coton. Elle acquiert une charge positive suffisamment importante lorsqu'elle est frottée entre deux tubes en PVC. Pour cela, placez une extrémité de la paille entre ces deux pièces bien comprimées et retirez-la rapidement des tubes en PVC.

Commencez avec une paille neutre en forme de lettre V à l'envers. Suspendez-la à un fil de soie passant par son centre. Frottez la moitié de cette paille avec une serviette en papier. Cette première moitié de la paille devient négativement électrisée. Tirez rapidement l'autre moitié de la paille, en l'éloignant des deux tubes en PVC comprimés. Cette deuxième moitié de la paille devient positivement électrisée. La paille est alors polarisée par cette procédure, bien que les deux parties puissent acquérir des charges d'amplitude différente, comme le montre la figure 5.17 (a). Dans cette situation, la paille a une charge totale, nette ou résultante différente de zéro. Un dipôle électrique se forme lorsque les deux parties sont électrisées de manière égale avec des charges opposées, figure 5.17 (b).

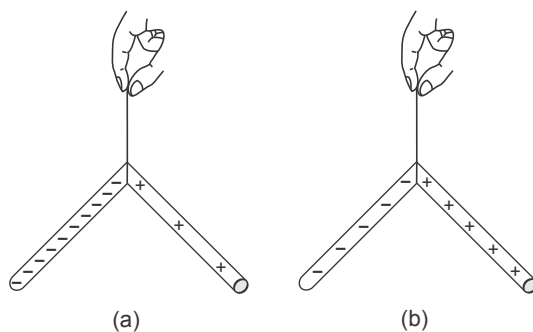


FIG. 5.17 : (a) La patte négative est plus électrisée que la patte positive. (b) Les pattes sont électrisées de manière égale avec des charges opposées.

Vous pouvez orienter ce dipôle en approchant une règle en acrylique négative de l'une de ses pattes.

Fabriquez un autre type de dipôle électrique à l'aide d'une barre ou d'un parallépipède en polystyrène mesurant, par exemple, $2 \times 2 \times 7$ cm ou $0,5 \times 0,5 \times 5$ cm.⁶ La taille exacte n'est pas très importante. En utilisant la série triboélectrique, tableau 1.1, nous savons que le polystyrène devient négatif lorsqu'il est frotté avec des cheveux, sur la peau ou avec du papier. Il devient positif lorsqu'il est frotté avec un sac en

⁶[Fersdb, Corpo com duas cargas diferentes, p. 11 ; e Pêndulo de isopor, p. 30].

plastique ou contre une plaque acrylique rigide. Frottez une extrémité de la barre de polystyrène sur un morceau de papier. Frottez l'autre extrémité de la barre sur une plaque acrylique rigide. La barre est ensuite soutenue par un fil de soie passant par son centre. Elle sera alors analogue à un pendule électrique, la barre remplaçant le disque de papier de la figure 2.10. La figure 5.18 illustre ce dipôle électrique en supposant des charges égales et opposées aux deux extrémités.

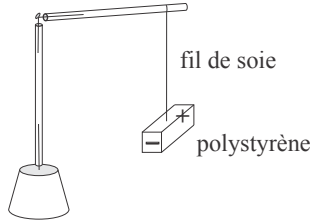


FIG. 5.18 : Barre en polystyrène polarisé.

Une paille négative repousse l'extrémité négative de cette barre et attire l'extrémité positive.

Deux de ces barres polarisées placées côte à côte s'orientent l'une vers l'autre. Une barre exercera non seulement un couple sur l'autre, mais aussi une force nette. À l'équilibre, les extrémités qui se font face auront des polarités opposées.

Fabriquez un dipôle électrique à l'aide d'un versorium en plastique. Choisissez deux matériaux appropriés pour frotter ses pattes. Ces matériaux doivent se trouver sur les côtés opposés de la série triboélectrique par rapport au matériau plastique du versorium. Autrement dit, un matériau doit se trouver entre le plastique et la charge positive, tandis que l'autre matériau doit se trouver entre le plastique et la charge négative. Électrisez une patte négativement et l'autre positivement. Un dipôle électrique se forme lorsque les deux pattes sont électrisées de manière égale avec des charges opposées, figure 5.19.

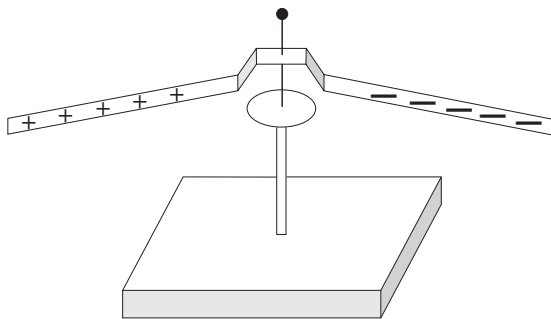


FIG. 5.19 : Versorium en plastique polarisé.

La patte négative est repoussée par une paille négative et attirée par une paille positive. La patte positive est repoussée par une paille positive et attirée par une paille négative.

5.6 Aspects généraux liés aux rubans adhésifs

Les substances adhésives sont connues depuis des milliers d'années. Les rubans adhésifs ont été inventés vers 1845 par le chirurgien Horace Day. Il a créé des rubans chirurgicaux en appliquant un adhésif à base de caoutchouc sur des bandes de tissu. Les rubans adhésifs commerciaux ont été introduits au début du XX^e siècle. Les rubans électriques ont été créés au début des années 1930. Ils étaient appelés « rubans à friction » et étaient constitués d'un ruban en tissu imprégné d'un matériau adhésif fabriqué à partir de gutta-percha. Dans les années 1940, le papier tissu a été remplacé par du ruban en plastique vinyle.

La plupart des rubans adhésifs utilisent un adhésif sensible à la pression, ou PSA. Cela signifie que le degré d'adhérence entre deux surfaces dépend de la pression exercée. De nos jours, la plupart des rubans sont constitués de bandes de vinyle, de PVC ou de plastique recouvertes d'un adhésif en caoutchouc sur une face et d'une couche antiadhésive sur l'autre. Cette dernière couche empêche l'adhésif de coller sur la face lisse lorsque la bobine est enroulée ou déroulée.

Chapitre 6

L'électrophore

6.1 L'instrument

Cette section présente un dispositif qui a joué un rôle important dans l'histoire de l'électricité, à savoir l'électrophore. Il se compose de deux parties : (a) une base isolante électrisée, associée à (b) un collecteur de charge. Ce collecteur de charge est composé d'un conducteur relié à une poignée isolante, section 2.6. La base isolante est également appelée plaque ou bloc diélectrique. Elle peut être chargée par friction ou par tout autre moyen. La figure 6.1 représente une plaque isolante chargée positivement, ainsi que le collecteur de charge de l'électrophore.

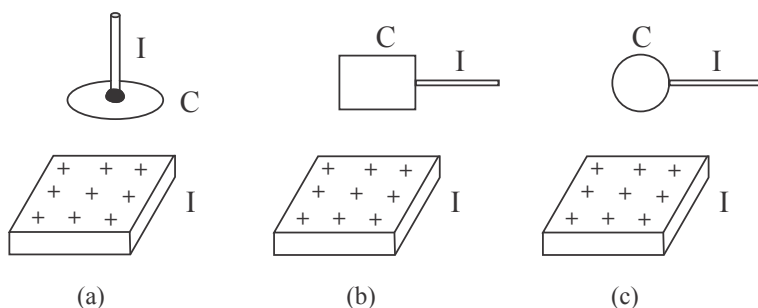


FIG. 6.1 : Exemples d'électrophores composés d'une plaque isolante I chargée positivement, avec son collecteur de charge, à savoir un conducteur C muni d'une poignée isolante I .

Normalement, la base isolante et le conducteur sont plats, bien que cet aspect ne soit pas essentiel. Ils doivent avoir la même forme afin d'offrir une grande surface de contact. La base isolante ou diélectrique a la même taille ou est plus grande que le conducteur. Il peut s'agir d'une feuille de plastique, d'une plaque de polystyrène, d'un boîtier de CD en plastique, d'une plaque en PVC, d'une plaque en acrylique, etc. Elle peut être électrisée en la frottant vigoureusement avec une serviette en papier, de la laine, un tissu en coton ou tout autre matériau approprié.

Certains auteurs utilisent le nom d'électrophore pour désigner uniquement la partie (b), à savoir le conducteur avec une poignée isolante. Cette partie (b) fonctionne comme un collecteur de charge.

Le collecteur de charge de la figure 6.1 (a) peut représenter, par exemple, le couvercle métallique d'une boîte de conserve ou un moule à pizza en aluminium relié à un tube en PVC. Ce collecteur de charge peut également représenter le plan de preuve de Coulomb, à savoir un disque conducteur en carton fin relié à une paille en plastique à l'aide de pâte à modeler.¹ Il peut également s'agir d'une plaque d'aluminium légère reliée à l'extrémité d'une fourchette en plastique horizontale à l'aide de ruban adhésif. Le collecteur de charge de la figure 6.1 (b) peut représenter, par exemple, un électroscope classique comme ceux utilisés dans cet ouvrage, mais sans sa bande de papier de soie. Dans ce cas, il s'agit simplement d'un carton rectangulaire relié à une paille en plastique. Le collecteur de charge de la figure 6.1 (c) peut représenter, par exemple, une boule en papier aluminium reliée à l'extrémité d'une paille en plastique, ou une sphère métallique à l'extrémité d'un tube en PVC.

Un électrophore particulier avec lequel nous avons obtenu une bonne électrisation utilise un moule à pizza de 30 cm de diamètre avec une poignée isolante en son centre. La base isolante de cet électrophore peut être une plaque carrée en PVC de 40 cm de côté. Cette base isolante est électrisée en la frottant vigoureusement avec une serviette en papier ou un mouchoir en coton. Cláudio Furukawa, de l'université de São Paulo, nous a offert cet électrophore.²

L'électrophore a été inventé par le physicien suédois Johan Carl Wilcke (1732–1796). Il a publié ses principaux résultats en 1762.³ Il avait publié la première série triboélectrique en 1757. L'électrophore a été amélioré et popularisé par Alessandro Volta vers 1775. Le nom « électrophore » est dû à Volta. Il est dérivé des mots grecs « elektron » (ambre) et « pherein » (porter), c'est-à-dire un fournisseur ou un porteur d'électricité.⁴ Cet instrument est généralement appelé « électrophore de Volta », bien qu'il ait été inventé par Wilcke.

Le scientifique allemand Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799) construisit en 1777 un très grand électrophore. Son collecteur de charge était un disque métallique de 2 m de diamètre. Cette plaque métallique était soulevée et abaissée à l'aide d'un système de poulies, produisant des étincelles pouvant atteindre 40 cm de long. Il utilisa cet électrophore pour produire les célèbres figures de Lichtenberg, à savoir des décharges électriques ramifiées à la surface de matériaux isolants.⁵

6.2 Fonctionnement de l'électrophore

Expérience 6.1 – Électrisation du collecteur de charge d'un électrophore

Cette section décrit comment utiliser l'électrophore. La figure 6.2 (a) représente une plaque de polystyrène électrisée négativement à sa surface par frottement avec

¹Section 2.6.

²[MFsd].

³[Hei99, pp. 418–419].

⁴[Hei99, pp. 416–417].

⁵[Lic56], [Har67, p. 89], [BJ92], [Beu92] et [Ach96, chapitre 5].

une serviette en papier. Le collecteur de charge de cet électrophore peut être un disque de carton fin muni d'une paille en plastique servant de poignée, ou un disque métallique muni d'un tube en PVC servant de poignée. La figure 6.2 (b) montre le disque sur la base isolante électrisée. Dans la figure 6.2 (c), un doigt touche n'importe quel endroit de la face supérieure du disque métallique. Retirez le doigt, figure 6.2 (d). Enfin, soulevez le collecteur de charge par sa poignée, figure 6.2 (e). Ne touchez pas son disque conducteur.

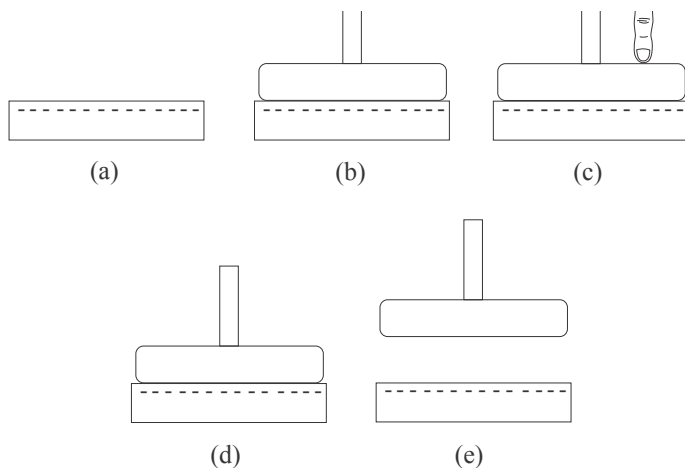


FIG. 6.2 : Fonctionnement de l'électrophore.

Chargez deux pendules électriques, l'un positivement et l'autre négativement. Ils doivent être maintenus séparés l'un de l'autre. Approchez lentement le collecteur de charge de l'électrophore de chacun de ces pendules. Observez qu'il repousse le pendule positif et attire le pendule négatif. Nous en concluons que l'électrophore s'est électrisé positivement au cours de cette opération.

Il existe une explication simple à cette électrisation basée sur l'induction électrique ou la polarisation, figure 6.3.

Lorsque le disque conducteur est placé sur la plaque isolante électrisée, il se polarise. Lorsqu'un doigt touche sa face supérieure, le disque conducteur est mis à la terre. Sa face supérieure est neutralisée, mais sa face inférieure reste électrisée en raison de la présence de la plaque isolante électrisée à proximité. Lorsque le doigt est retiré, rien ne change sur le disque. Lorsque le disque est soulevé par sa poignée, il y a une redistribution de la charge nette du disque entre ses faces supérieure et inférieure. À la fin du processus, l'électrophore devient électrisé avec une charge nette de signe opposé à celui de la base électrisée.

La figure 6.4 illustre la situation dans laquelle le collecteur de charge est composé d'une sphère métallique avec une poignée isolante. Il touche une plaque isolante électrisée positivement, devenant ainsi chargé négativement à la fin du processus.

L'expérience 6.1 montre que le collecteur de charge s'électrise avec une charge de signe opposé à celui de la base. L'électricité stockée dans le collecteur de charge

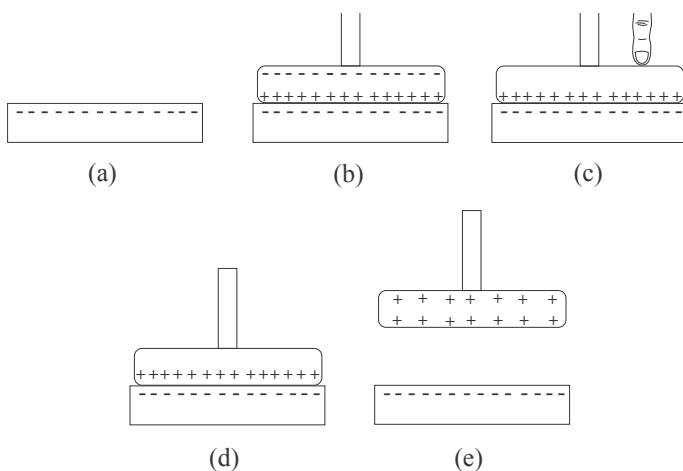


FIG. 6.3 : Électrisation du collecteur de charge avec une charge nette de signe opposé à celui de la base.

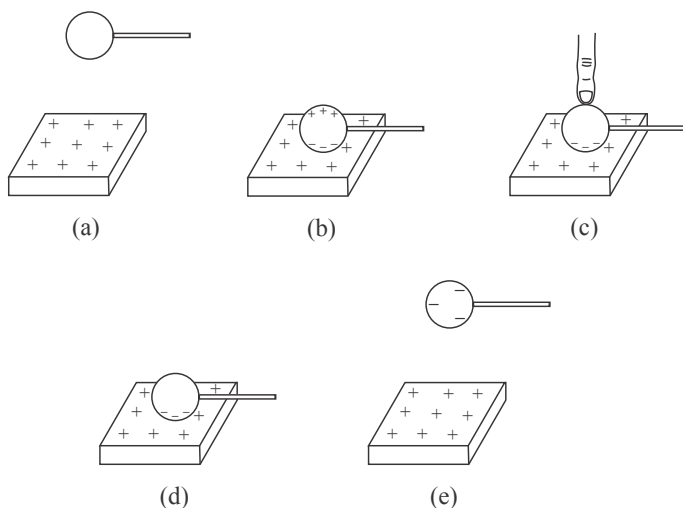


FIG. 6.4 : Conducteur sphérique touchant une plaque isolante positive.

peut être facilement transportée n'importe où lorsque le collecteur est tenu uniquement par sa poignée isolante. Elle peut ensuite être partiellement transférée à un autre conducteur isolé du sol lorsque le collecteur de charge électrisé touche ce conducteur. Lorsque ce conducteur est beaucoup plus grand que le collecteur de charge, il acquiert la majeure partie de l'électricité initialement stockée dans le collecteur.

Il est très facile d'électriser et de manipuler un électrophore. *Mais son principal avantage est que tout ce processus d'électrisation peut être répété plusieurs fois sans que la base électrisée ne perde sa charge de manière appréciable.* Supposons que, à chaque

cycle de fonctionnement, nous transférons toute la charge collectée vers un autre conducteur. Après de nombreux cycles, nous transférons une quantité de charge dont l'amplitude est beaucoup plus grande que la quantité de charge répartie sur la base électrisée. Ce fait remarquable s'explique simplement. À chaque cycle, le collecteur de charge touche la base électrisée en quelques points de contact seulement. Seuls ces points seront neutralisés. Les autres régions de la base électrisée ne sont pas neutralisées dans ce processus. Après tout, il s'agit d'un isolant qui ne permet pas le mouvement de ses particules électrisées. De plus, les charges acquises par le collecteur à chaque cycle ne sont pas fournies par la plaque électrisée. Elles sont fournies par la Terre pendant la mise à la terre avec un doigt. L'importance de la base électrisée est de polariser le conducteur du collecteur de charge. Le collecteur de charge acquiert une charge nette grâce à la mise à la terre. Comme la surface de la Terre conductrice est énormément plus grande que la surface du collecteur de charge, la Terre dispose d'une quantité presque inépuisable de charges libres qui peuvent être fournies au collecteur de charge pendant de nombreux cycles de fonctionnement.

Dans tous les cas, la base électrisée se décharge lentement. L'une des raisons est la faible quantité de particules électrisées échangées avec le collecteur de charge aux points de contact. Une autre raison est la faible conductivité de l'air due à la présence d'ions mobiles. De plus, elle perd également une partie de ses particules électrisées au sol. Après tout, bien qu'elle soit isolante, il n'existe pas d'isolants parfaits dans la nature. Le polystyrène, le plastique, l'acrylique et d'autres matériaux isolants présentent toujours une faible conductivité. Mais normalement, ces pertes d'électrisation sont très faibles et ne sont pas facilement perceptibles par temps sec. Normalement, vous pouvez faire fonctionner l'électrophore pendant quelques minutes, en répétant plusieurs fois le cycle de charge, sans remarquer la perte d'électrisation de sa base. De plus, même lorsque la quantité d'électricité de la base diminue avec le temps ou avec les cycles de fonctionnement de l'électrophore, il suffit de frotter une fois de plus la base isolante pour restaurer son électrisation d'origine. Vous pouvez alors produire une toute nouvelle série de cycles de fonctionnement.

Le collecteur de charge d'un électrophore peut être électrisé plusieurs fois sans décharger de manière appréciable sa base. C'est pourquoi Volta a appelé cet appareil un « *elettroforo perpetuo* » (« électrophore perpétuel »), c'est-à-dire un fournisseur inépuisable d'électricité. Son bloc diélectrique conservait presque indéfiniment son électricité pendant de nombreux cycles de fonctionnement :^{6,7}

[...] électrisé une seule fois, brièvement et modérément, ne perd jamais son électricité, et bien que touché à plusieurs reprises, conserve obstinément la force de ses signes.

Expérience 6.2 — *Chargement d'un électroscope en contact avec une base électrisée*

Dans cette expérience, la base ou plaque isolante rectangulaire électrisée de l'électrophore reste fixe par rapport au sol dans un plan vertical, figure 6.5 (a).

⁶[Hei99, p. 416].

⁷[...] electrified but once, briefly and moderately, never loses its electricity, and although repeatedly touched, obstinately preserves the strength of its signs.

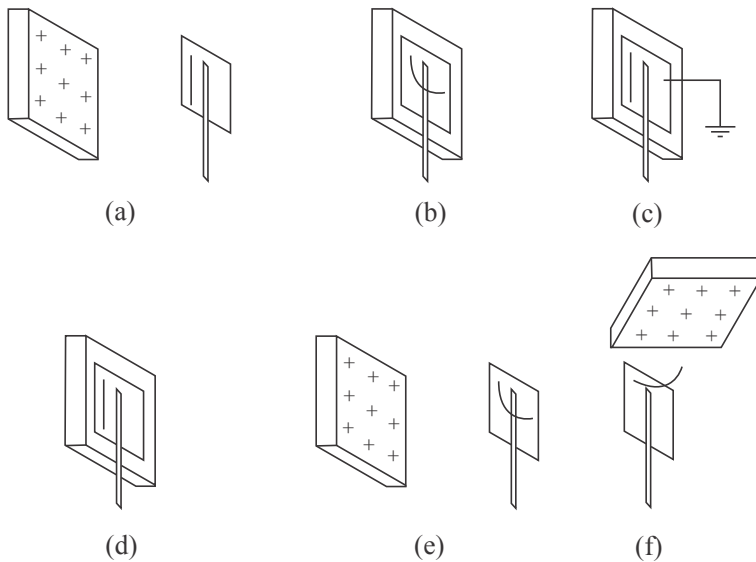


FIG. 6.5 : (a) Base électrisée et collecteur de charge de l'électrophore muni d'une bande de papier de soie. (b) La bande se soulève lorsque le carton touche la plaque électrisée. (c) La bande retombe pendant la mise à la terre. (d) Elle reste en bas lorsque la mise à la terre est supprimée. (e) Elle se soulève lorsque le collecteur sort de la base. (f) Bande attirée par la plaque électrisée.

Le collecteur de charge sera un carton fin rectangulaire de 7 cm sur 10 cm relié à une paille en plastique. Une fine bande de papier de soie est collée sur la face extérieure de ce collecteur de charge, c'est-à-dire du même côté que la paille. Tenez le collecteur de charge par sa paille et placez le carton sur la plaque électrisée, en la touchant. La bande s'éloigne du carton, figure 6.3 (b). Mettez le carton à la terre pendant qu'il touche la base électrisée. Ce processus de mise à la terre peut être effectué, par exemple, en touchant le carton avec un doigt. La bande tombe, collant au rectangle, figure 6.3 (c). La bande reste en bas lorsque la mise à la terre est supprimée, figure 6.3 (d). Retirez l'électrophore de la plaque électrisée en tenant sa poignée isolante. La bande remonte, figure 6.3 (e). Placez la plaque isolante électrisée positivement dans une position horizontale. Approchez-la du carton, sa bande se déplace vers la plaque, figure 6.5 (f). Ce fait indique que le collecteur s'est électrisé avec une charge de signe opposé à celui de la plaque électrisée.

Ce comportement peut s'expliquer par la distribution de charge de la figure 6.3, en inversant les signes de toutes les charges.

Expérience 6.3 — *Le serpent électrique*

Réalisez l'expérience du « serpent électrique ».⁸ Le collecteur de charge de l'électrophore sera le disque de la figure 6.1 (a). Placez des morceaux de papier (ou de petits morceaux de feuille d'aluminium ou de papier de soie) sur le disque, du même côté que celui où la poignée isolante a été fixée. Le collecteur de charge est électrisé comme dans l'expérience 6.1. Lorsque le collecteur de charge sort de la base électrisée, certains morceaux de papier sautent du disque. Approchez maintenant un doigt de la partie supérieure du disque. Les morceaux de papier restants sont attirés par le doigt, le touchent et retombent sur le disque.

Cette expérience ne fonctionne pas correctement lorsque les morceaux de papier sont remplacés par de petits morceaux d'un matériau isolant comme un sac en plastique.

Cette expérience est liée à l'effet de l'ambre, qui montre un phénomène opposé. Dans l'effet de l'ambre, une paille frottée s'approche de petits morceaux de papier et ceux-ci sautent vers le plastique frotté. Bien que les morceaux de papier soient initialement neutres, ils sont polarisés par la paille électrisée à proximité. Lorsque les morceaux de papier reposent sur une surface conductrice, ils acquièrent une charge nette de signe opposé à celui de la paille à proximité.⁹

Dans la présente expérience, en revanche, le disque de l'électrophore et les morceaux de papier qui se trouvent sur le disque s'électrisent avec des charges de même signe lorsque nous séparons le collecteur de charge de la base électrisée. En raison de la répulsion exercée par le disque électrisé sur les morceaux de papier électrisés, certains morceaux de papier sautent du disque lorsque celui-ci sort de la base. Lorsqu'un doigt est approché du disque, les morceaux de papier restants sont attirés par celui-ci. Le doigt est un conducteur mis à la terre. Il est initialement neutre lorsqu'il est éloigné du disque électrisé. Lorsqu'il s'approche du disque électrisé, le bout du doigt se charge d'une charge de signe opposé à celle du disque. Le doigt électrisé attire alors les morceaux de papier de charge opposée. Comme les morceaux de papier restants sont également repoussés par le disque électrisé, ils se déplacent vers le doigt. Lorsque les petits morceaux de papier touchent le doigt, ils acquièrent une charge nette de même signe que celle du doigt en raison du mécanisme ACR. Ils sont alors repoussés par le doigt et attirés par le disque, retombant sur celui-ci.

Cette expérience et l'effet de l'ambre illustrent le principe d'action et de réaction. Dans l'effet de l'ambre, une paille électrisée attire des morceaux de papier qui étaient initialement neutres. Ici, en revanche, les morceaux de papier électrisés sont attirés par un doigt qui était initialement neutre.

6.3 Un témoignage personnel

Je cite ici une expérience particulière qui pourrait être utile à d'autres personnes. Pendant mes études de physique à l'université de Campinas (UNICAMP) entre 1980

⁸[FR08, p. 86].

⁹Comme discuté dans la sous-section 4.1.2. Voir également la section 8.3 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

et 1983, j'ai lu des articles sur l'électrophore et j'ai décidé de construire cet instrument. J'ai utilisé le couvercle circulaire d'une boîte métallique comme collecteur de charge. J'ai scié 20 cm d'un manche à balai en bois pour en faire une poignée isolante. J'ai fixé la poignée au disque à l'aide d'un clou. J'ai utilisé plusieurs bases isolantes, comme un sac en plastique, une plaque en acrylique ou une plaque en PVC. Pour électriser cette base, je l'ai frottée avec une serviette en papier, un mouchoir en coton et d'autres matériaux.

J'ai essayé quelques expériences simples décrites dans les manuels, mais j'ai toujours échoué. En d'autres termes, je n'ai pas réussi à reproduire avec mon électrophore les phénomènes électriques décrits dans les manuels. Au départ, j'ai supposé que la base n'avait pas reçu une quantité d'électricité suffisante. J'ai changé le matériau de la plaque de base, mais rien n'a changé. J'ai changé les substances utilisées pour frotter la plaque, mais là encore, rien n'a changé. Finalement, j'ai décidé de changer les méthodes de friction. Rien n'a fonctionné. J'ai fini par abandonner cette expérience et d'autres liées à l'électricité. J'ai conclu que c'était de ma faute, que je n'étais pas doué pour la physique expérimentale. Cette expérience frustrante a été l'une des raisons pour lesquelles j'ai décidé de me consacrer à la physique théorique.

Au début des années 1990, j'ai découvert les travaux de Norberto Ferreira.¹⁰ J'ai alors enfin découvert la véritable raison de mon échec. Ce n'était pas un manque d'habileté manuelle. Mon erreur était d'avoir utilisé un manche en bois comme matériau isolant. À l'époque, je pensais que ce manche était un isolant simplement parce qu'il était en bois. Après tout, c'était le message implicite que l'on trouvait dans la plupart des manuels didactiques. Ils mentionnaient que le bois, le verre, le caoutchouc, l'eau et de nombreuses autres substances étaient des isolants, en présentant même leurs constantes diélectriques. Les métaux et le corps humain, en revanche, étaient considérés comme des conducteurs. Au cours de mes études de premier cycle, je n'aurais jamais imaginé qu'un morceau de bois puisse se comporter comme un conducteur. Je n'ai donc jamais essayé de tester son comportement conducteur et je n'ai pas envisagé de le remplacer par un tube en PVC ou un autre matériau.

Grâce aux travaux de Norberto Ferreira, j'ai découvert que la plupart des matériaux se comportent comme des conducteurs dans les expériences électrostatiques. Ces matériaux conducteurs comprennent de nombreux types de bois, le verre, le caoutchouc, l'eau du robinet, etc. Cet aspect a été la leçon la plus importante que j'ai tirée de ses travaux. Autrement dit, plutôt que de dire qu'un certain corps est un conducteur ou un isolant, il est plus correct de mentionner que ce matériau « se comporte comme » un conducteur ou un isolant, « en fonction des conditions internes et externes qui lui sont appliquées ». En particulier, lorsque nous appliquons une haute tension entre les extrémités d'un corps, un certain matériau qui se comporte habituellement comme un isolant pour les basses tensions peut alors se comporter comme un conducteur. Comme en électrostatique, nous avons généralement affaire à des tensions élevées, allant généralement de 1 000 V à 10 000 V, la plupart des matériaux se comportent comme des conducteurs.

Il est probable que le manche en bois que j'ai utilisé dans le collecteur de charge de mon électrophore se comportait comme un conducteur. C'est pourquoi je n'ai pas pu

¹⁰[Fer78], [FM91], [Fersda], [Fersdb], [Fersdc], [Fersdd], [Fer06], [Fer01c], [Fer01d], [Fer01b] et [Fer01a].

collecter de charges avec cet instrument et que les expériences ont échoué. En remplaçant le manche à balai en bois par un tube en PVC ou par un autre manche isolant, les expériences simples décrites dans les manuels scolaires peuvent être facilement reproduites.

Mon échec ou ma frustration initiale illustre l'importance de toujours tester le comportement conducteur des matériaux avant de commencer toute expérience. À cette fin, la meilleure procédure pour savoir si une substance se comporte comme un conducteur ou un isolant consiste à utiliser le test de l'électroscope décrit dans la section 3.1. Norberto Ferreira m'a également appris à construire des électroscopes simples et bon marché, ainsi que de nombreux autres appareils qui fonctionnent parfaitement bien. Ce fut la deuxième leçon importante que j'ai apprise avec lui.

Chapitre 7

Répartition des charges dans un conducteur

Ce livre présente plusieurs expériences avec des conducteurs creux. Il s'agit généralement d'une coque cylindrique en papier, en carton ou en métal (comme une tasse ou une boîte de conserve). Cette coque cylindrique est parfois appelée cylindre. Cependant, elle n'a pas de couvercle, ni au-dessus ni en dessous, afin que vous puissiez voir ce qui se passe à l'intérieur. Vous pouvez également utiliser un filet métallique cylindrique. Si nécessaire, le cylindre peut être isolé du sol en le soutenant à l'aide de pailles verticales fixées avec du ruban adhésif. La coque cylindrique est également isolée lorsqu'elle repose sur une plaque de polystyrène ou un boîtier de CD en acrylique. Plus la plaque est épaisse, meilleure sera son isolation. Une bonne isolation pour ces expériences peut être obtenue avec des plaques de 2 à 5 cm d'épaisseur.

7.1 Répartition des charges dans les conducteurs

7.1.1 Expériences avec des électroscopes

Expérience 7.1 — *Électrisation d'une coque cylindrique*

Préparez la coque cylindrique de la figure 7.1 (a). Cette coque sera utilisée comme électroscope courbe. Les bandes de papier de soie internes et externes indiqueront les densités de charge superficielle situées sur les parois internes et externes.

Découpez un rectangle en papier ou en carton fin de 10 cm sur 20 cm (ou 10 cm sur 30 cm). Fixez une paille en plastique à l'aide de ruban adhésif de manière à ce qu'une partie dépasse du rectangle. Fermez le rectangle en formant une coque cylindrique. Les bords du papier qui se côtoient peuvent être collés ou fixés à l'aide d'une agrafeuse. Cette coque cylindrique sera parfois simplement appelée cylindre. Découpez de très petites bandes de papier de soie, de 1 à 3 mm de large et de 5 à 9 cm de long. Leurs extrémités supérieures doivent être collées à l'intérieur et à l'extérieur du cylindre. La paille verticale est ensuite fixée sur un support approprié, comme le support fabriqué à partir d'un gobelet en plastique fin, de plâtre et d'une attache-papier, figure 7.1 (a).

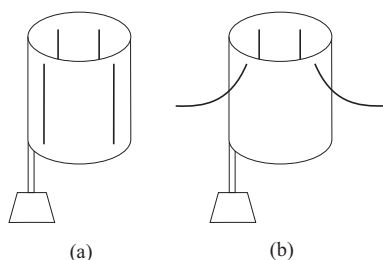


FIG. 7.1 : (a) Coque cylindrique en papier isolée du sol. (b) Coque cylindrique électrisée avec bandes externes relevées. Plus l'électrisation du cylindre est importante, plus ses bandes sont hautes.

Électrisez une paille en plastique ou une règle en acrylique en la frottant avec des cheveux ou une serviette en papier. Racliez plusieurs fois la paille frottée sur le bord supérieur du cylindre jusqu'à ce qu'il s'électrise, comme l'indiquent ses bandes relevées. Le cylindre peut également être électrisé à l'aide d'un électrophore, comme celui fabriqué avec un carton fixé à une paille en plastique, figure 6.1 (b). Pour électriser la coque en papier, touchez le bord supérieur du cylindre avec l'électrophore électrisé. Ce processus doit être répété plusieurs fois, en électrisant toujours l'électrophore avant de le toucher sur le cylindre. Lorsque le cylindre acquiert une quantité d'électricité suffisante, observez que seules ses bandes externes restent relevées, éloignées du cylindre. Ses bandes internes, en revanche, restent basses, attachées au cylindre même lorsqu'il est électrisé, comme indiqué dans la figure 7.1 (b).

De plus, les bandes externes se soulèvent peu à peu. Autrement dit, leur angle d'élévation augmente chaque fois que la paille électrisée est raclée sur le cylindre ou chaque fois qu'un électrophore électrisé touche son bord supérieur. Elles montent jusqu'à atteindre un certain degré de saturation. Une fois cette déviation maximale atteinte, vous pouvez racler le cylindre avec la paille électrisée ou le toucher avec un électrophore électrisé, sans que les bandes ne montent plus haut.

Expérience 7.2 — *Électrisation un rectangle en papier*

Découpez un rectangle en papier ou en carton fin de 7 cm sur 20 cm (ou 10 cm sur 30 cm). Fixez deux ou trois pailles avec du ruban adhésif de manière à ce qu'une partie de chaque paille dépasse de la bande. La bande doit rester verticale, les pailles étant fixées sur des supports appropriés. Découpez deux fines bandes de papier de soie de 6 cm de long et de 1 à 3 mm de large. L'extrémité supérieure d'une bande doit être collée au centre d'un côté du papier, tandis que l'extrémité supérieure de l'autre bande doit être collée au centre de l'autre côté du papier, comme indiqué dans la figure 7.2. Cet instrument ressemblera à un électroscope plus large, avec une bande de papier de soie de chaque côté. Il est isolé du sol par les pailles en plastique.

Racliez une paille électrisée sur le bord supérieur du rectangle. Les bandes des deux côtés se soulèvent, figure 7.3. Le rectangle peut également être électrisé en touchant son bord supérieur avec le collecteur de charge d'un électrophore électrisé.

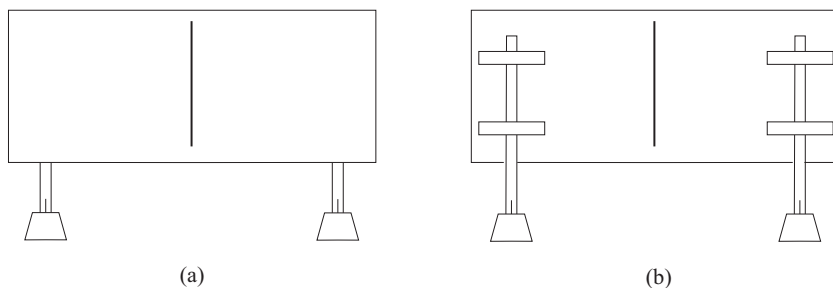


FIG. 7.2 : (a) Rectangle de papier vu de face. (b) Vue arrière.

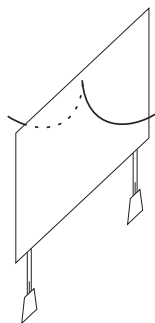


FIG. 7.3 : Rectangle électrisé.

Ce processus de charge peut être répété plusieurs fois. Plus le rectangle est électrisé, plus l'angle d'élévation de ses bandes est élevé.

Expérience 7.3 — Pliage d'un rectangle électrisé

Appelons A un côté du rectangle et B l'autre côté. Tenez l'électroscope de l'expérience 7.2 par ses pailles en plastique ou par les bases faites de tasses à café, de gypse et d'attaches-papier, sans toucher le papier rectangulaire. Il se déforme alors en forme de coque circulaire.¹ Lorsque nous fermons le cercle, la bande intérieure du côté B descend, tandis que la bande extérieure du côté A monte, figure 7.4 (a). Lorsque nous fermons le cercle, la bande intérieure descend. De plus, la bande extérieure est plus haute dans cette configuration de la figure 7.4 (a) que les bandes des deux côtés de la figure 7.3.

Ouvrez la coque circulaire pour revenir au rectangle. Créez une autre coque circulaire en pliant le rectangle vers l'autre côté. La bande de papier de soie sur le côté B , qui était vers le bas dans la figure 7.4 (a), est maintenant relevée et se trouve sur le côté extérieur du nouveau cercle, figure 7.4 (b). La bande de papier de soie du côté A , qui était vers le haut dans la figure 7.4 (a), est maintenant vers le bas, située à l'intérieur du nouveau cercle, figure 7.4 (b).

¹[FM91, pp. 74–75], [Fersdb, Gaiola de Faraday, p. 45] et [FR08, pp. 89–90].

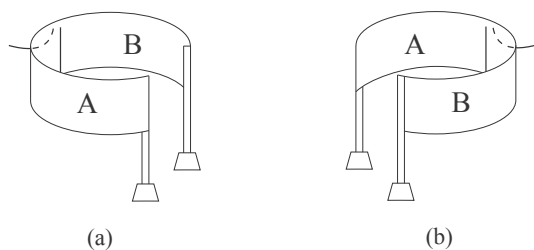


FIG. 7.4 : Coque circulaire électrisée. (a) et (b) : les bandes intérieures descendent, tandis que les bandes extérieures remontent.

Expérience 7.4 — *Séparation des deux parties d'un conducteur électrisé*

Une expérience analogue utilise un instrument composé de deux parties indépendantes qui peuvent être séparées l'une de l'autre.² La première partie de cet instrument est un simple électroscope composé d'un carton rectangulaire relié à deux pailles en plastique fixées sur deux supports appropriés. Deux fines bandes de papier de soie sont collées sur cet électroscope, une de chaque côté, comme le montre la figure 7.2. La deuxième partie de cet instrument est une coque circulaire en papier ou en carton fin. Les pailles et les cartons des deux parties doivent avoir la même hauteur. Cette coque circulaire est également reliée à deux pailles fixées sur des supports appropriés. Au départ, les bords des deux parties se touchent. Les bandes de papier de soie des deux côtés de l'électroscope doivent être vers le bas.

Électrisez le système en raclant le bord supérieur de l'électroscope avec une paille frottée. Le système peut également être chargé en touchant le carton avec un électrophore électrisé. Avec cette procédure, la bande de papier de soie externe remonte, tandis que la bande de papier de soie interne reste vers le bas, figure 7.5 (a).

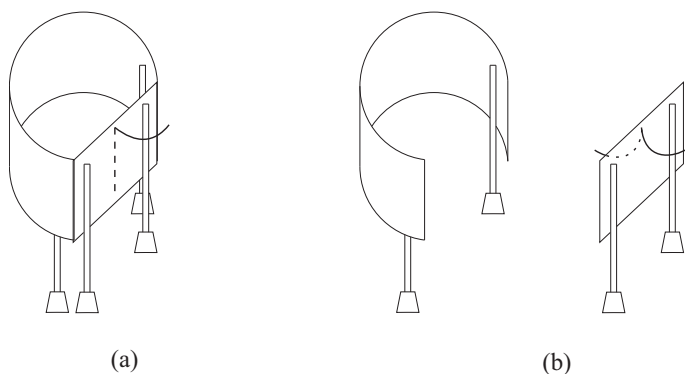


FIG. 7.5 : (a) Système électrisé avec les deux cartons en contact l'un avec l'autre. Seule la bande de papier de soie externe remonte. (b) Lorsque les deux parties sont séparées, la bande externe descend légèrement, tandis que la bande interne remonte.

²[Fer78, section 4.10.9, pp. 89–90].

Séparez les deux parties de cet instrument en tenant uniquement les supports ou les pailles, sans toucher les cartons. La bande externe descend légèrement, tandis que la bande interne de la figure 7.5 (a) remonte, comme indiqué dans la figure 7.5 (b).

7.1.2 Collecte des charges situées sur les parois internes et externes d'un conducteur électrisé

Les expériences précédentes n'ont analysé que le comportement des fines bandes de papier de soie. Les expériences suivantes montrent comment collecter directement une partie des particules électrisées réparties sur les parois internes et externes d'une coque cylindrique électrisée.

Expérience 7.5 — *Tentative de collecte de charges sur la paroi interne d'une coque cylindrique électrisée*

Utilisez maintenant la coque cylindrique de l'expérience 7.1 sans les bandes internes et avec une seule bande de papier de soie externe. Ce cylindre est isolé du sol par la paille en plastique. Raclez une paille chargée négativement sur son bord supérieur, jusqu'à ce que sa bande de papier de soie se soulève, figure 7.6 (a). La coque devient chargée négativement.

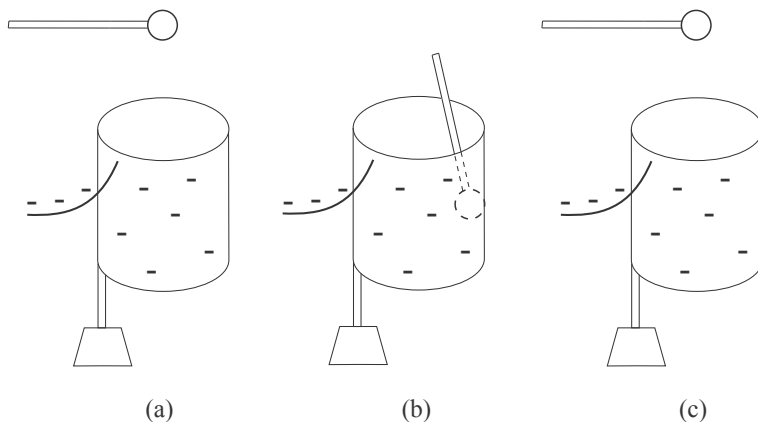


FIG. 7.6 : (a) Un collecteur déchargé et une coque cylindrique chargée négativement. (b) Touchez la boule en feuille d'aluminium sur la paroi interne de la coque cylindrique. (c) En retirant le collecteur de charge, vérifiez qu'il reste déchargé.

Le collecteur de charge sera une boule de feuille d'aluminium reliée à l'extrémité d'une paille en plastique, figure 2.15 (b). Ce collecteur doit être initialement déchargé, figure 7.6 (a).

En tenant le collecteur par sa paille, touchez la boule de feuille d'aluminium sur la paroi interne du cylindre électrisé, figure 7.6 (b). Retirez le collecteur et testez son électrisation. Pour ce faire, approchez-le d'un pendule électrique déchargé ou d'un versorium métallique. Observez que le pendule électrique et le versorium métallique

ne bougent pas. Nous en concluons que le collecteur n'a acquis aucune charge nette en touchant la paroi interne du cylindre électrisé, figure 7.6 (c).

Expérience 7.6 — *Collecte des charges sur la paroi externe d'une coque cylindrique électrisée*

Répétez l'expérience 7.5 en recommençant avec un collecteur déchargé et une coque cylindrique chargée négativement, figure 7.7 (a).

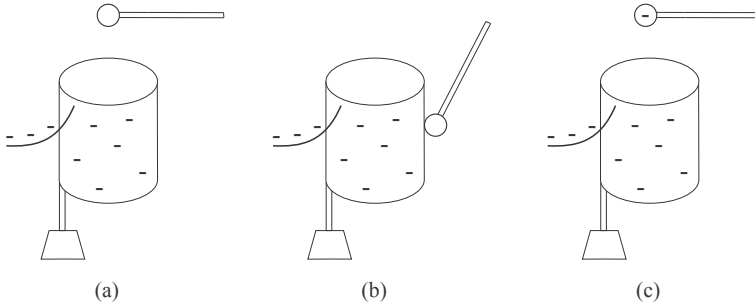


FIG. 7.7 : (a) Un collecteur déchargé et une coque cylindrique chargée négativement. (b) Touchez la boule en feuille d'aluminium sur la paroi externe de la coque cylindrique. (c) Retirez le collecteur de charge et testez sa charge, en vérifiant qu'il est chargé négativement.

Touchez la boule en feuille d'aluminium sur la paroi *externe* du cylindre électrisé, figure 7.7 (b). Testez sa charge en la déplaçant vers un pendule neutre ou un versorium métallique. Le pendule et le versorium sont attirés par la boule, ce qui indique qu'elle est désormais électrisée. Approchez la boule électrisée de deux pendules électrisés séparés l'un de l'autre, l'un positif et l'autre négatif. La boule attire le pendule positif et repousse le pendule négatif, ce qui démontre que le collecteur de charge est devenu négativement électrisé, figure 7.7 (c).

Expérience 7.7 — *Tentative de collecte de charges sur la paroi interne d'une coque cylindrique électrisée à l'aide d'un petit électroscope*

L'expérience 7.5 peut également être réalisée avec un autre collecteur de charge, à savoir un morceau de carton carré relié à une paille. Le petit carré peut avoir des côtés de 5 cm. L'extrémité supérieure d'une fine bande de papier de soie peut être collée sur ce carton afin d'indiquer quand il est chargé. Ce collecteur sera utilisé comme un électroscope habituel, mais cette fois-ci avec l'extrémité supérieure de la bande de papier de soie collée sur le côté opposé du carton, comme indiqué dans la figure 7.8 (a). Raclez le carton avec une paille frottée ou touchez-le avec un électrophore chargé. Ce collecteur est électrisé, comme l'indique sa bande soulevée, figure 7.8 (b).

Le collecteur doit être initialement déchargé, avec sa bande de papier de soie à la verticale. Recommencez l'expérience avec une coque cylindrique chargée négativement, figure 7.9 (a).

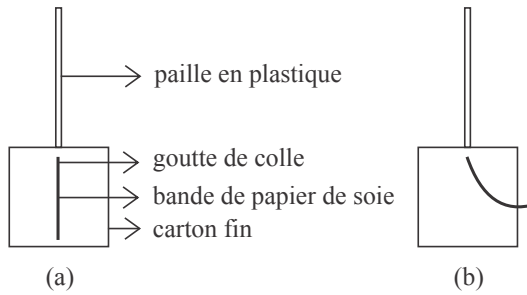


FIG. 7.8 : (a) Collecteur déchargé. (b) Collecteur électrisé.

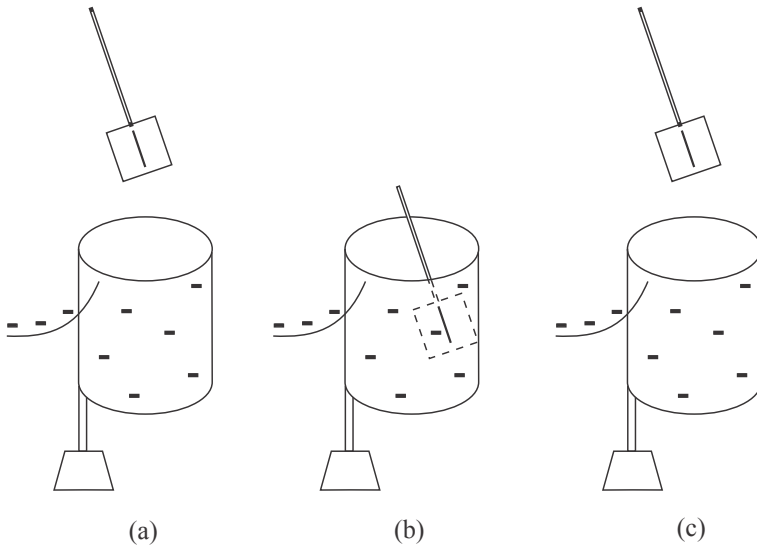


FIG. 7.9 : (a) Un collecteur déchargé et une coque cylindrique chargée négativement. (b) Touchez le bord du carton sur la paroi interne de la coque cylindrique chargée. (c) En retirant le collecteur de charge, vérifiez qu'il reste déchargé.

Tout en tenant le collecteur par sa paille, touchez un bord du carton sur la paroi interne de la coque cylindrique électrisée, figure 7.9 (b). La bande du collecteur reste vers le bas. Elle reste attachée au carton lorsque le collecteur de charge sort de la coque, figure 7.9 (c). Cela indique que le collecteur de charge reste déchargé.

Expérience 7.8 — *Collecte de charges sur la paroi externe d'une coque cylindrique électrisée à l'aide d'un petit électroscope*

Recommencez l'expérience 7.7 avec un collecteur déchargé et une coque cylindrique chargée négativement, figure 7.10 (a).

Touchez un bord du carton sur la paroi externe de la coque cylindrique électrisée.

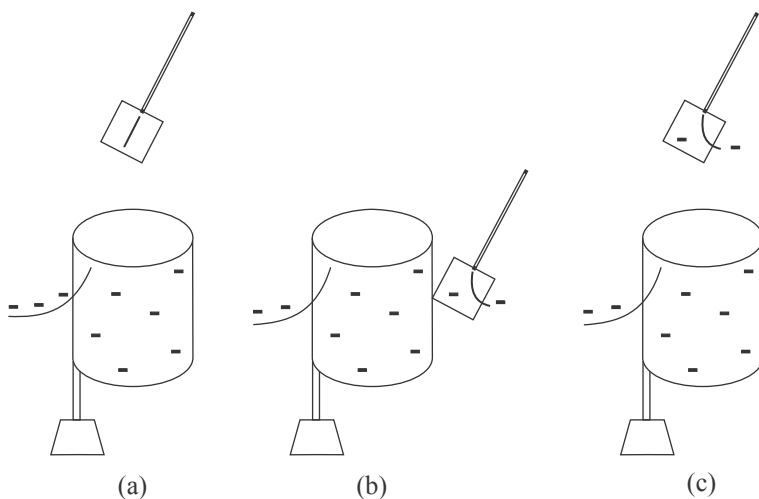


FIG. 7.10 : (a) Un collecteur déchargé et une coque cylindrique chargée négativement. (b) Touchez le bord du carton sur la paroi externe de la coque cylindrique chargée. (c) En retirant le collecteur de charge, vérifiez qu'il est désormais chargé négativement.

La bande du collecteur se soulève, figure 7.10 (b). Remarquez que parfois, la bande externe de l'électroscope chargé s'abaisse légèrement. Lorsque le collecteur est retiré, sa bande reste relevée. Vous pouvez tester sa charge en l'approchant d'un pendule chargé positivement, puis d'un pendule chargé négativement. Il attire le pendule positif et repousse le pendule négatif, ce qui montre que le collecteur est chargé négativement, figure 7.10 (c).

7.1.3 Gray, Franklin et la répartition des charges sur les conducteurs électrisés

Les expériences décrites dans les sous-sections 7.1.1 et 7.1.2 montrent que dans un conducteur creux électrisé, les charges ne se répartissent que sur sa surface *externe*. Stephen Gray fut le premier scientifique à parvenir à cette conclusion, en 1731, lorsqu'il réalisa un autre type d'expérience.³ Il a suspendu deux cubes de chêne aux extrémités d'une corde conductrice (sa ligne de communication). Ils étaient de taille identique, mais l'un était creux et l'autre plein. La corde était isolée du sol, suspendue par des cordes faites de cheveux. De fines feuilles de laiton ont été placées sous les cubes. Il a approché un tube de verre électrisé du centre de la corde conductrice et a observé que les deux cubes attiraient la même quantité de feuilles à la même hauteur, comme l'illustre la figure 7.11.

Nous présentons ci-dessous les propos de Gray décrivant son expérience (nos

³Section B.8 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

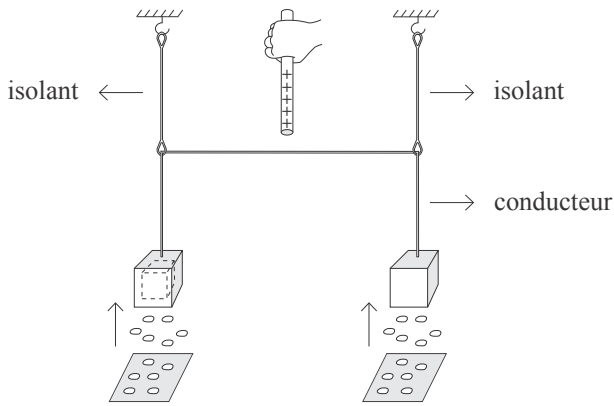


FIG. 7.11 : Deux cubes en chêne, l'un creux et l'autre plein, attirent les feuilles en laiton avec la même intensité.

commentaires sont entre crochets et nous avons mis en italique sa conclusion) :^{4,5}

Quelque temps après, chez M. Wheler, nous avons réalisé l'expérience suivante afin de vérifier si l'attraction électrique était proportionnelle à la quantité de matière contenue dans les corps.

Nous avons fabriqué deux cubes en chêne d'environ six pouces carrés [15 cm²], l'un plein, l'autre creux. Ceux-ci ont été suspendus à deux cordes faites de cheveux, presque de la même manière que dans l'expérience mentionnée ci-dessus. La distance entre les cubes était, selon nos estimations, d'environ quatorze ou quinze pieds [4,6 m]; la ligne de communication étant attachée à chaque fil, et la feuille de laiton placée sous les cubes, le tube [de verre] a été frotté et maintenu au-dessus du milieu de la ligne [de communication], et aussi près que possible, à égale distance des cubes, lorsque les deux ont attiré et repoussé la feuille de laiton en même temps, et à la même hauteur; *de sorte qu'il semblait n'y avoir pas plus d'attraction dans le cube plein que dans le cube creux; pourtant, je suis enclin à penser que les effluves électriques traversent toutes les parties intérieures du cube plein, bien qu'aucune partie autre que la surface n'attire*; car plusieurs expériences montrent que si un autre corps touche celui qui attire, son attraction cesse jusqu'à ce que ce corps soit retiré et que l'autre soit à nouveau excité par le tube.

⁴[Gra32d, p. 35], [Bos11, pp. 160–161] et [BAC12, pp. 154–155].

⁵*Some Time after, at Mr. Wheler's, we made the following Experiment, in order to try whether the Electric Attraction be proportional to the Quantity of Matter in Bodies.*

There were made two Cubes of Oak, of about six Inches Square [15 cm²], the one solid, the other hollow : These were suspended by two Hair-Lines, nearly after the same Manner as in the Experiment above-mentioned; the Distance of the Cubes from each other, was by Estimation, about fourteen or fifteen Feet [4.6 m]; the Line of Communication being tied to each Hair-Line, and the Leaf-Brass placed under the Cubes, the [glass] Tube was rubbed and held over the Middle of the [communication] Line, and as near as could be guessed, at equal Distances from the Cubes, when both of them attracted and repelled the Leaf-Brass at the same Time, and to the same Hight; *so that it seemed to be no more Attraction in the solid than in the hollow Cube; yet I am apt to think that the Electric Effluvia pass through all the interior Parts of the solid Cube, though no Part but the Surface attracts*; for from several Experiments it appears, that if any other Body touches that which attracts, its Attraction ceases till that Body be removed, and the other be again excited by the Tube.

Benjamin Franklin fut le premier scientifique à réaliser en 1755 une expérience analogue aux expériences 7.5 et 7.7, bien qu'il ne fût pas en mesure d'expliquer ses conclusions (nos commentaires entre crochets) :^{6,7}

J'ai électrisé un récipient en argent d'une pinte, posé sur un support électrique [c'est-à-dire sur un support isolant], puis j'y ai descendu une boule de liège d'environ un pouce de diamètre, suspendue à un fil de soie, jusqu'à ce que le liège touche le fond du récipient. Le bouchon n'a pas été attiré vers l'intérieur de la canette comme il l'aurait été vers l'extérieur, et bien qu'il ait touché le fond, lorsqu'on l'a retiré, il n'était pas électrisé par ce contact, comme il l'aurait été s'il avait touché l'extérieur. Ce fait est singulier. Vous en demandez la raison : je l'ignore.

En 1775, Joseph Priestley (1733–1804) s'est servi de l'expérience de Franklin pour conclure que l'attraction électrique varie comme l'inverse du carré de la distance entre les corps en interaction, par analogie avec ce qui se passe avec l'attraction gravitationnelle :^{8,9}

Ne pouvons-nous pas déduire de cette expérience que l'attraction électrique obéit aux mêmes lois que la gravitation, et qu'elle est donc proportionnelle au carré de la distance, puisqu'il est facile de démontrer que si la Terre avait la forme d'une coquille, un corps situé à l'intérieur ne serait pas attiré davantage d'un côté que de l'autre ?

Priestley faisait ici référence à deux théorèmes célèbres d'Isaac Newton (1642–1727), figure 7.12.

Ces théorèmes ont été inclus dans la section XII du livre I de son célèbre ouvrage, connu sous son nom latin, *Principia*. Nous utiliserons la traduction en langue française, par la Marquise du Chastellet, *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle* :¹⁰

DOUZIÈME SECTION.

Des forces attractives des corps sphériques.

PROPOSITION LXX. THÉORÈME XXX.

Un corpuscule placé dans l'intérieur d'une surface sphérique dont toutes les parties attirent en raison renversée du carré des distances, n'éprouve aucune attraction de cette superficie. [...]

⁶[Fra69, Letter XXIV, p. 334] et [Hei99, p. 464].

⁷I electrified a silver pint cann, on an electric stand [that is, on an insulating stand], and then lowered into it a cork-ball, of about an inch diameter, hanging by a silk string, till the cork touched the bottom of the cann. The cork was not attracted to the inside of the cann as it would have been to the outside, and though it touched the bottom, yet, when drawn out, it was not found to be electrified by that touch, as it would have been by touching the outside. The fact is singular. You require the reason; I do not know it.

⁸[Pri75, pp. 372–374], [Pri66, pp. 372–374], [Whi73a, pp. 53–54] et [Hei99, p. 464].

⁹May we not infer from this experiment that the attraction of electricity is subject to the same laws with that of gravitation, and is therefore according to the squares of the distances; since it is easily demonstrated that were the earth in the form of a shell, a body in the inside of it would not be attracted to one side more than another.

¹⁰[New90a, pp. 201–202], [New34, p. 193], [New90, p. 221], [Ass13, pp. 9–10] et [Ass14, pp. 10–11].

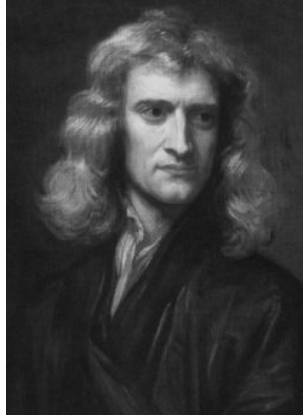


FIG. 7.12 : Isaac Newton (1642–1727). Il s’agit du portrait le plus célèbre de Newton. Il a été réalisé par Godfrey Kneller (1646–1723) en 1689. Newton y apparaît avec ses cheveux naturels, au sommet de sa carrière scientifique, deux ans après la publication des *Principia*.

PROPOSITION LXXI. THÉORÈME XXXI.

La même loi d’attraction étant posée, un corpuscule, placé au dehors de la surface sphérique, est attiré par cette surface en raison renversée du carré de la distance de ce corpuscule au centre.

Les théorèmes de Newton sont valables pour une coque sphérique. Ils ne sont pas valables pour une coque cylindrique avec une densité de masse superficielle uniforme. Franklin, d’autre part, a montré qu’une boîte électrisée n’exerce aucune force sur une balle de liège neutre placée n’importe où à l’intérieur de la boîte. Il existe une différence entre les configurations gravitationnelles et électriques. Dans une boîte conductrice, les particules électrisées sont libres de se déplacer. En équilibre, elles s’organisent de telle manière que toutes les parties de la boîte électrisée acquièrent le même potentiel électrostatique. Dans cette configuration d’équilibre, la densité de charge superficielle varie d’un point à l’autre. De plus, en équilibre, la boîte conductrice électrisée ne polarisera pas un conducteur neutre placé n’importe où à l’intérieur de la boîte, sauf à proximité de son couvercle ouvert. Comme le conducteur interne n’est pas polarisé par la boîte électrisée, il ne sera attiré vers aucun côté de la boîte, même s’il s’en approche.

7.1.4 Conducteurs électrisés touchant les parois internes et externes d’un autre conducteur

Dans les expériences 7.5 à 7.8, nous avons commencé avec une coque cylindrique électrisée et un collecteur déchargé. Inversez cette procédure. Commencez avec un collecteur électrisé qui touchera une coque cylindrique initialement déchargée.

Expérience 7.9 — *Électrisation d'une coque cylindrique en touchant sa paroi interne avec un collecteur de charge électrisé*

Utilisez la coque cylindrique de l'expérience 7.1 sans bandes internes et avec une seule bande de papier de soie externe. Le cylindre est isolé du sol par la paille en plastique. Il peut également être isolé lorsqu'il est posé sur une plaque en polystyrène. Il doit être initialement déchargé, avec sa bande de papier de soie à la verticale. Utilisez un collecteur de charge composé d'une coque sphérique conductrice reliée à une poignée isolante, comme dans la figure 2.15 (b). En particulier, supposez une boule de feuille d'aluminium à l'extrémité d'une paille. Elle sera utilisée comme collecteur de charge d'un électrophore, étant chargée par la procédure illustrée dans la figure 6.4. Autrement dit, une plaque isolante rectangulaire est initialement électrisée par frottement avec une serviette en papier ou un mouchoir en coton. Tenez le collecteur de charge par sa poignée, touchez la partie inférieure de la boule d'aluminium sur la plaque électrisée, placez un doigt sur le dessus de la boule, retirez le doigt et enfin retirez la boule en soulevant sa paille. Le collecteur de charge est alors électrisé. Cela peut être vérifié en le rapprochant d'un pendule électrique déchargé et en observant l'attraction du disque du pendule.

Tenez le collecteur de charge électrisé par sa paille. Touchez la boule d'aluminium électrisée sur la paroi interne de la coque cylindrique. Répétez cette procédure plusieurs fois, en électrisant toujours le collecteur de l'électrophore avant chaque contact. Observez que la bande de papier de soie externe de la coque cylindrique se soulève peu à peu à chaque contact avec la boule électrisée. En analysant la charge du cylindre, concluez qu'il s'électrise avec une charge du même signe que celle de la boule. Ce fait peut être visualisé lorsque la boule du collecteur de charge est à nouveau électrisée et qu'elle est approchée de la bande externe soulevée. Observez leur répulsion.

Électrisez à nouveau la boule du collecteur de charge. Touchez à nouveau la paroi interne du cylindre électrisé. Retirez la boule et testez sa charge lorsqu'elle est rapprochée d'un pendule électrique déchargé. Observez qu'il n'y a pas d'attraction entre eux, ce qui indique que la boule a été complètement déchargée lorsqu'elle a touché la paroi interne du cylindre. Que le cylindre soit totalement déchargé ou qu'il ait une charge initiale, la boule électrisée est totalement déchargée lorsqu'elle touche la paroi interne de la coque cylindrique, figure 7.13.

Expérience 7.10 — *Approcher une boule neutre ou électrisée de la bande externe d'une coque cylindrique*

Observez d'autres faits dans l'expérience 7.9. Supposons que la coque cylindrique soit déchargée. Électrisez le collecteur de charge de l'électrophore. Approchez la boule électrisée du collecteur de la bande de papier de soie externe de la coque cylindrique, sans les laisser entrer en contact. Observez que la bande de papier de soie est attirée par la boule électrisée. Cette attraction est due à la polarisation de la coque cylindrique produite par la présence de la boule électrisée à proximité.

Répétez l'expérience 7.9 en électrisant la coque cylindrique. Pour ce faire, touchez la boule électrisée sur la paroi interne de la coque, en répétant cette procédure plusieurs fois jusqu'à ce que la coque soit suffisamment électrisée, comme l'indique sa

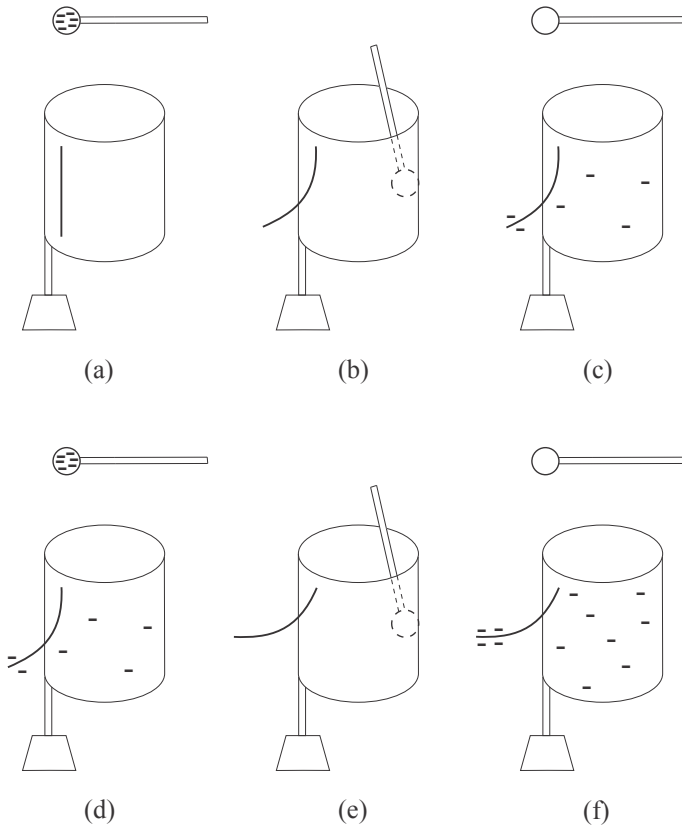


FIG. 7.13 : (a) Cylindre déchargé et collecteur électrisé. (b) Touchez le collecteur chargé sur la paroi interne du cylindre. Cette procédure peut être répétée plusieurs fois. (c) à (f) : Le collecteur se décharge toujours complètement après chaque contact, tandis que le cylindre devient de plus en plus électrisé.

bande soulevée.

Électrisez à nouveau la boule du collecteur de charge de l'électrophore et approchez-la de la bande soulevée. Observez dans ce cas une répulsion de la bande. Cette répulsion indique que la boule et la bande sont électrisées avec des charges de même signe.

Touchez à nouveau la boule électrisée sur la paroi interne du cylindre électrisé. Cette procédure décharge totalement la boule, comme on le voit dans l'expérience 7.9. Retirez la boule déchargée et approchez-la de la bande soulevée, sans les laisser entrer en contact. Observez à nouveau la bande attirée par la boule. Cette fois, l'attraction est due à la polarisation de la boule conductrice causée par l'électrisation du cylindre et de sa bande soulevée. La boule est isolée du sol par sa paille.

Expérience 7.11 — *Coque cylindrique avec bandes internes et externes*

L'expérience 7.9 peut également être réalisée lorsque la coque cylindrique comporte des bandes de papier de soie fines à l'intérieur et à l'extérieur. Commencez avec une coque déchargée comportant des bandes verticales. Dans ce cas, lorsque la boule électrisée en feuille d'aluminium pénètre dans la coque cylindrique, la bande interne est attirée par celle-ci. Laissez-les entrer en contact, puis séparez-les. Observez que la bande interne tombe après ce contact. Lorsqu'elle est à nouveau verticale, elle n'est plus attirée vers la boule qu'elle vient de toucher. Retirez le collecteur de charge. Testez son électrisation. Concluez qu'il a été complètement déchargé lorsque la bande interne a été touchée par la boule.

Répétez cette procédure plusieurs fois. Les bandes internes sont toujours attirées, touchent la boule électrisée et retombent. Les bandes externes, en revanche, deviennent à chaque fois plus inclinées par rapport à la surface externe de la coque. De plus, chaque fois que nous testons l'électrisation de la boule après son contact avec la bande interne, nous concluons qu'elle se décharge complètement.

Expérience 7.12 — *Électrisation d'une coque cylindrique en touchant sa paroi externe avec un collecteur de charge électrisé*

Réalisez une variante de l'expérience 7.9. Cette fois-ci, la boule électrisée en feuille d'aluminium ne touche que la paroi externe de la coque cylindrique. Après chaque contact, la boule est à nouveau électrisée par l'électrophore. Observez que la bande externe de papier de soie se soulève de plus en plus après chaque contact. La bande interne, en revanche, reste toujours verticale, quel que soit le nombre de fois où la boule électrisée touche le cylindre. Testez également l'électrisation de la boule après chaque contact avec la paroi externe du cylindre. Observez qu'elle reste toujours légèrement chargée. Ce fait peut être vérifié lorsque cette boule est approchée d'un autre électroscope déchargé. Observez que la boule attire la bande de papier de soie de l'électroscope. Ce fait peut également être vérifié lorsque la boule est approchée de la bande externe du cylindre électrisé qu'elle vient de toucher. Observez que cette bande soulevée est repoussée par la boule, ce qui indique qu'elle n'a pas été complètement déchargée lorsqu'elle a touché la paroi externe. La coque cylindrique, en revanche, est de plus en plus électrisée à chaque contact avec la boule électrisée, figure 7.14.

Expérience 7.13 — *Répéter ces expériences avec un petit électroscope*

Les expériences 7.9 et 7.12 peuvent être répétées en utilisant le collecteur de charge de l'expérience 7.7, figure 7.8. Ce collecteur doit être initialement électrisé, comme l'indique sa bande relevée.

Tenez le collecteur de charge électrisé par sa paille et touchez un bord du carton sur la paroi interne d'une coque cylindrique initialement déchargée. Le collecteur se décharge immédiatement, comme l'indique sa bande verticale. La bande externe du cylindre, en revanche, se soulève légèrement. Répétez ce processus plusieurs fois, en électrisant toujours le collecteur avant chaque contact. Il est alors possible d'électriser considérablement le cylindre, comme l'indique sa bande de plus en plus haute. Chaque fois que le collecteur électrisé touche la paroi interne du cylindre, il perd presque toute

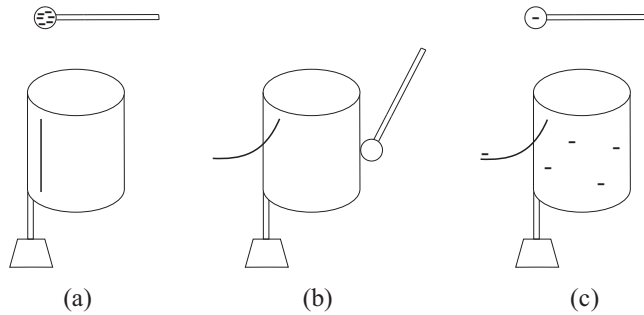


FIG. 7.14 : (a) Cylindre déchargé et collecteur électrisé. (b) Le collecteur touche la paroi externe du cylindre. (c) Le collecteur perd une partie de sa charge tandis que le cylindre s'électrise légèrement.

sa charge. Parfois, sa bande reste légèrement inclinée par rapport au carton, indiquant qu'il n'a pas perdu toute sa charge. Il ne perdrait complètement toute sa charge que si le cylindre était complètement fermé, avec des couvercles inférieur et supérieur. Comme au moins un de ces couvercles doit être absent pour permettre le passage du collecteur, celui-ci conserve parfois une petite partie de sa charge même après avoir touché la paroi interne du cylindre. Mais même dans ce cas, on observe qu'il perdra presque toute son électrisation, quelle que soit la quantité de charge déjà acquise par la coque cylindrique électrisée.

Supposons maintenant que le collecteur de charge électrisé touche la paroi externe d'une coque cylindrique isolée initialement neutre. La bande du collecteur de charge s'abaisse légèrement, restant inclinée par rapport à son carton. La bande externe du cylindre se soulève légèrement par rapport à la coque cylindrique. Répétez cette procédure plusieurs fois, en chargeant toujours le collecteur avant chaque contact. La bande externe de la coque cylindrique se soulève petit à petit. La bande du collecteur de charge ne descend jamais complètement après chaque contact, restant toujours légèrement inclinée par rapport à son carton.

Après une certaine électrisation du cylindre, vous atteignez un point de saturation. Touchez la paroi externe du cylindre électrisé avec le collecteur chargé. Observez qu'il ne se passe rien. Autrement dit, le collecteur de charge reste électrisé et la bande relevée du cylindre ne change pas son angle d'inclinaison par rapport au cylindre. Il n'y a plus d'échange de charges entre ces deux conducteurs électrisés, car les deux bandes conservent leurs angles d'inclinaison par rapport à leurs cartons.

7.1.5 Répartition des charges dans les conducteurs ouverts et fermés

Les expériences précédentes indiquent que dans un conducteur courbé, les charges sont situées à l'extérieur, comme l'indique l'inclinaison des bandes de la figure 7.4. De plus, comme les bandes externes de la figure 7.4 sont plus hautes que les deux bandes de la figure 7.3, nous en concluons que les charges qui se trouvaient d'un côté du

rectangle se sont déplacées de l'autre côté lorsque nous l'avons déformé en une coque circulaire.

La figure 7.15 (a) illustre une distribution qualitative des charges sur le carton rectangulaire de la figure 7.3 vu de dessus.

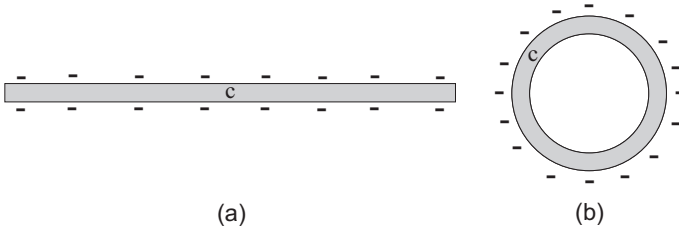


FIG. 7.15 : (a) Représentation qualitative de la répartition des charges sur le carton rectangulaire de la figure 7.3 vu de dessus. (b) Répartition des charges sur la coque cylindrique de la figure 7.4 vu de dessus.

La lettre c désigne le conducteur, à savoir le carton. Nous exagérons son épaisseur afin d'indiquer la répartition des charges sur sa surface externe. Lorsqu'il prend la forme d'une coque cylindrique, comme dans la figure 7.4, les charges qui se trouvaient d'un côté du rectangle s'écourent vers l'autre côté. Lorsque le système atteint un nouvel état d'équilibre, il n'y a plus de charges à l'intérieur de la coque cylindrique, toutes les charges se trouvent à l'extérieur, figure 7.15 (b).

7.2 Charges induites sur les parois internes et externes d'un conducteur creux

Expérience 7.14 — Règle électrisée à l'intérieur d'une coque cylindrique

Utilisez une coque cylindrique conductrice recouverte à l'extérieur de fines bandes de papier de soie. Le cylindre est isolé du sol lorsqu'il est posé sur des pailles en plastique ou au-dessus d'une assiette en polystyrène. Il doit être initialement déchargé, avec ses bandes à la verticale, figure 7.16 (a).

Chargez négativement une règle en plastique en la frottant avec des cheveux ou une serviette en papier. Introduisez-la dans la coque cylindrique sans qu'elle ne touche les parois. Les bandes s'éloignent du cylindre, figure 7.16 (b). Lorsque la règle ressort, les bandes reprennent leur orientation verticale initiale le long de la coque cylindrique, figure 7.16 (c).

Répétez cette expérience. Cette fois-ci, pendant que la règle électrisée se trouve à l'intérieur du cylindre, approchez une deuxième règle électrisée négativement de l'une des bandes soulevées, sans les laisser entrer en contact. Observez que la bande soulevée est repoussée par la règle électrisée, car elle a tendance à s'en éloigner, en s'inclinant vers le cylindre, figure 7.17 (a). En revanche, lorsqu'une règle chargée positivement s'approche de cette bande, observez leur attraction, figure 7.17 (b).

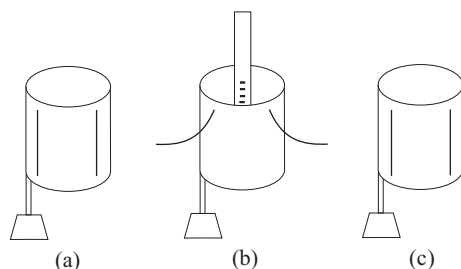


FIG. 7.16 : (a) Coque cylindrique déchargée et isolée. (b) Lorsqu'une règle électrisée est placée à l'intérieur de la coque, sans la toucher, les bandes se soulèvent. (c) Lorsque la règle électrisée est retirée, les bandes retombent.

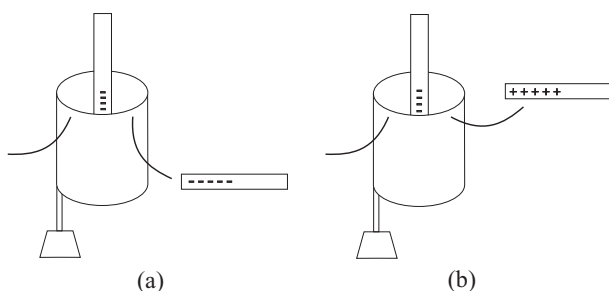


FIG. 7.17 : (a) Bande repoussée par une règle chargée négativement. (b) Bande attirée par une règle chargée positivement.

Cette expérience illustre la polarisation électrique. La coque cylindrique est isolée du sol. Lorsque la règle négative pénètre à l'intérieur, la paroi interne du cylindre devient chargée positivement, tandis que la paroi externe devient chargée négativement.

Expérience 7.15 — *Mise à la terre de la coque cylindrique alors que la règle électrisée se trouve à l'intérieur*

Répétez l'expérience 7.14. La figure 7.18 (a) illustre une coque cylindrique déchargée isolée du sol.

La figure 7.18 (b) montre le comportement des bandes lorsqu'une règle négative pénètre à l'intérieur de la coque. Cette fois-ci, lorsque la règle chargée négativement se trouve à l'intérieur du cylindre, reliez la coque à la terre. Ses bandes tombent, comme indiqué dans la figure 7.18 (c). Retirez la mise à la terre pendant que la règle chargée reste à l'intérieur du cylindre. Ses bandes restent en bas, figure 7.18 (d). En retirant la règle, les bandes remontent, restant inclinées par rapport au cylindre, figure 7.18 (e). Approchez la règle chargée négativement du cylindre. Elle attire les bandes, figure 7.18 (f).

Cette expérience illustre l'électrisation par induction. À la fin de cette procédure, le

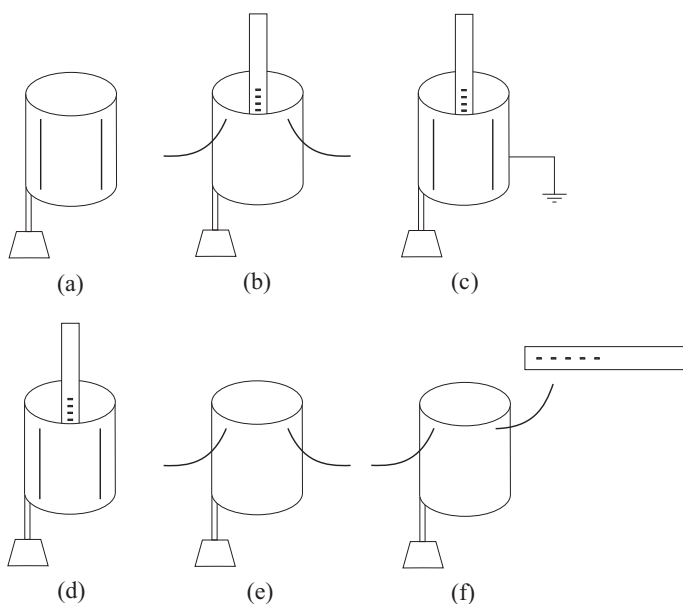


FIG. 7.18 : Électrisation de la coque cylindrique par induction.

cylindre devient électrisé avec une charge de signe opposé à celui de la règle. Lorsque la règle électrisée négativement pénètre dans le cylindre, il y a une polarisation de ses charges. En particulier, la paroi interne devient électrisée positivement tandis que la paroi externe devient électrisée négativement, figure 7.19 (a).

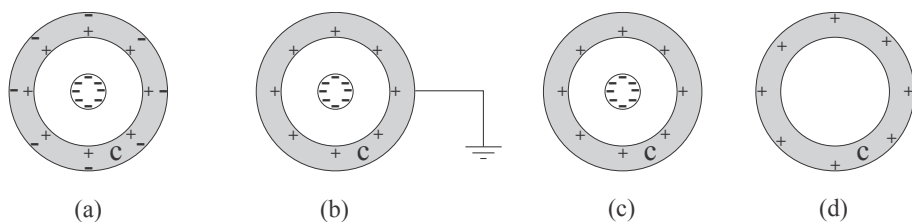


FIG. 7.19 : (a) Conducteur creux c isolé du sol et polarisé en raison de la présence d'un corps chargé négativement à l'intérieur. (b) Conducteur mis à la terre avec neutralisation de sa paroi externe. (c) La distribution des charges ne change pas lorsque la mise à la terre est supprimée. (d) Lorsque le corps interne est retiré, il y a une redistribution des charges. Elles se trouvent désormais uniquement sur la paroi externe.

En reliant la coque à la terre, nous neutralisons l'électricité de la paroi externe. La paroi interne reste chargée positivement en raison de l'attraction exercée par les charges négatives de la règle, figure 7.19 (b). Lorsque la mise à la terre est supprimée, rien ne change dans la répartition des charges, figure 7.19 (c). En retirant la règle, il y a une redistribution des charges sur le cylindre. Les charges positives ne sont désormais

réparties que sur sa paroi externe, figure 7.19 (d).

7.3 Actions exercées par un conducteur creux électrisé sur des corps internes et externes

Expérience 7.16 — Action d'une coque cylindrique électrisée sur un pendule électrique interne

Commencez avec une coque cylindrique conductrice isolée du sol par des pailles ou lorsqu'elle est soutenue par une plaque isolante. Elle doit être initialement déchargée. La coque peut être en papier ou en carton. Il peut également s'agir d'une canette de soda. L'extrémité supérieure d'une fine bande de papier de soie est collée sur la paroi externe. Utilisez également un pendule électrique composé d'un petit disque de papier attaché à un fil de soie. Ce pendule doit également être initialement neutre. Le disque du pendule est ensuite placé à l'intérieur de la coque cylindrique, près de sa paroi mais sans la toucher, entre ses bords supérieur et inférieur, figure 7.20 (a).

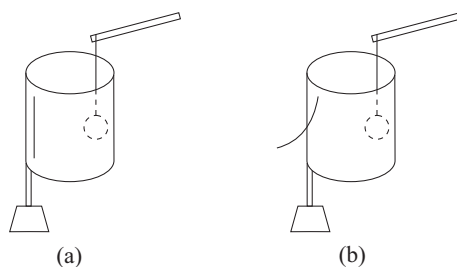


FIG. 7.20 : (a) Coque cylindrique isolée avec un pendule électrique interne. (b) Le disque en papier n'est pas affecté lorsque la coque cylindrique est électrisée.

Le pendule électrique doit rester à l'intérieur de la coque, sans la toucher. Électrisez la coque en raclant une paille sur son bord supérieur. Elle peut également être électrisée en touchant son bord supérieur avec un collecteur de charge électrisé d'un électrophore. L'électrisation de la coque est indiquée par sa bande relevée. Le pendule interne n'est pas affecté par l'électrisation de la coque cylindrique. Autrement dit, il n'est ni attiré ni repoussé par sa paroi, figure 7.20 (b).

Expérience 7.17 — Action d'une coque cylindrique électrisée sur un pendule électrique externe

Répétez l'expérience 7.16, en commençant cette fois-ci avec le pendule à l'extérieur de la coque cylindrique. Le disque doit être proche de la paroi, sans la toucher, figure 7.21 (a).

Électrisez la coque en raclant une paille sur son bord supérieur ou en la touchant avec un électrophore électrisé. Le disque de papier est alors attiré par la coque. Il se déplace vers elle et adhère à sa paroi. Parfois, il se détache immédiatement, repoussé

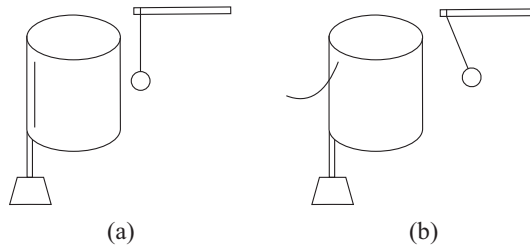


FIG. 7.21 : (a) Coque cylindrique conductrice isolée du sol avec un pendule électrique à l'extérieur. (b) Lorsque la coque est électrisée, le disque en papier est attiré, touche la coque, puis est repoussé par le cylindre grâce au mécanisme ACR.

par la paroi électrisée grâce au mécanisme ACR. D'autres fois, cette répulsion ne se produit que lorsque la coque a été électrisée de manière plus significative. D'autres fois, il faut tapoter la paille ou souffler doucement sur le disque pour le détacher de la paroi. Observez ensuite sa répulsion. Normalement, vous pouvez observer cette répulsion lorsque la coque cylindrique est suffisamment électrisée, comme indiqué dans la figure 7.21 (b).

7.4 L'expérience du seau à glace de Faraday

Michael Faraday (1791–1867) a réalisé en 1843 une expérience analogue à l'expérience 7.9. Il a utilisé un seau à glace en métal de 27 cm de haut et 18 cm de diamètre, isolé du sol.¹¹ Son collecteur de charge était une boule de laiton ronde suspendue à un fil de soie de 90 à 120 cm de long. Dans la figure 7.22, le seau à glace est représenté par la lettre *A*, la boule de laiton par la lettre *B*, tandis que l'isolation du seau et de la boule est représentée par les lettres *I*. La paroi extérieure du seau était reliée par un fil conducteur à un électromètre délicat à feuille d'or *E*.

Lorsque le seau à glace a été déchargé, les feuilles de l'électroscope sont restées verticales. Lorsqu'une boule chargée positivement a été introduite dans le seau, sans le toucher, les feuilles de l'électroscope se sont écartées les unes des autres, indiquant que la paroi extérieure du seau avait été électrisée. En étudiant la charge de l'électroscope, Faraday a conclu qu'il était également chargé positivement. En retirant la boule électrisée, les feuilles de l'électroscope se sont affaissées. En introduisant lentement la boule électrisée, il a constaté que la divergence de l'électroscope augmentait jusqu'à ce que la sphère se trouve à environ 7,6 cm sous la surface du seau, restant avec une ouverture constante pour toute dépression plus importante. Ce fait indiquait à Faraday que toute l'action inductive de la sphère s'exerçait sur la paroi interne du seau et non sur les objets externes. Lorsque la boule électrisée a atteint le fond du seau, il a observé que la sphère était complètement déchargée. Il en conclut que la charge induite par la boule électrisée à l'extérieur du seau avait la même valeur et le même signe que la charge initialement présente sur la boule. De même, la charge induite sur la paroi

¹¹[Far43b].

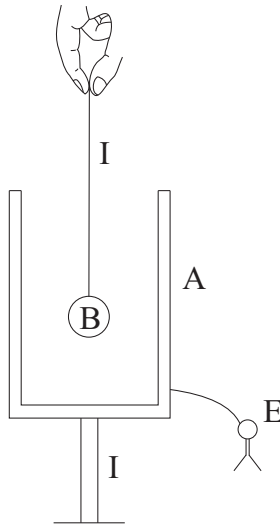


FIG. 7.22 : L'expérience du seau à glace de Faraday.

interne du seau avait la même intensité que celle de la boule, mais un signe opposé. Lorsque la boule électrisée a touché le fond du récipient, il y a eu une neutralisation entre les charges de la boule et celles situées sur la paroi interne du récipient.

Il a remplacé la boule de bronze par des morceaux électrisés de gomme laque, un matériau isolant. Ceux-ci agissaient exactement comme les supports métalliques, produisant les mêmes effets. Il n'y avait qu'une seule exception, à savoir que leur charge n'était pas communiquée au récipient métallique lorsqu'ils entraient en contact les uns avec les autres.

De plus, il a observé que la boule métallique électrisée interne pouvait être placée près de n'importe quel côté du récipient sans affecter la divergence de l'électroscope. Ce fait a indiqué à Faraday que la distribution des charges sur la paroi externe du seau n'était pas affectée par la position du corps électrisé à l'intérieur de celui-ci. Cette conclusion est illustrée dans la figure 7.23.

La figure 7.23 (a) montre un corps chargé positivement B au centre d'un seau isolé A . Les charges induites sur le seau sont réparties symétriquement sur les parois internes et externes. La figure 7.23 (b) montre B plus proche d'un côté du seau. Dans ce cas, il y a une redistribution des charges uniquement sur la paroi interne. Les charges sur la paroi externe ne sont pas affectées. Dans cette figure, nous avons également représenté la redistribution des charges sur le conducteur B . La figure 7.23 (c) illustre la neutralisation qui se produit lorsque B touche le seau. Ses charges sont neutralisées par les charges égales et opposées qui se sont réparties sur la paroi interne du seau à glace. Une fois de plus, les charges sur la paroi externe ne sont pas affectées.

James Clerk Maxwell (1831–1879), Joseph John Thomson (1856–1940) et James H. Jeans (1877–1946) ont utilisé cette expérience afin de quantifier le concept de charge.¹²

¹²[Max54a, articles 27–36, pp. 32–41], [Tho21, pp. 5–6] et [Jea27, pp. 7–10].

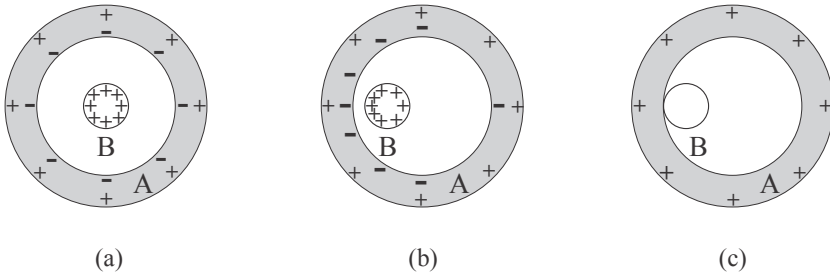


FIG. 7.23 : (a) Seau à glace isolé A polarisé en raison de la présence d'un corps électrisé B en son centre. Les charges réparties sur les parois interne et externe du seau ont la même intensité que celle de B . (b) Redistribution des charges réparties sur la paroi interne du seau lorsque B est proche d'un de ses côtés. (c) Lorsque B touche le seau, il y a neutralisation entre sa charge et celles réparties sur la paroi interne du seau à glace.

L'angle d'ouverture des feuilles de l'électroscope serait un indicateur de la quantité de charge sur le corps situé à l'intérieur du seau. Supposons que le corps A produise un angle d'ouverture θ_A lorsqu'il est seul à l'intérieur du seau. Supposons que le corps B produise un angle d'ouverture θ_B lorsqu'il est seul à l'intérieur du seau. Lorsque $\theta_A = \theta_B$, nous disons que les corps A et B ont des charges de même magnitude. Deux corps auraient des charges égales et opposées si, lorsqu'ils sont introduits simultanément dans le seau, ils ne produisent aucune divergence de l'électroscope. En suivant cette procédure, nous pourrions également définir des charges positives et négatives, ainsi que des multiples de n'importe quelle charge. Par exemple, supposons qu'un corps C produise un angle d'ouverture θ_C lorsqu'il est seul à l'intérieur du seau. Si θ_C est égal à l'angle d'ouverture de l'électroscope lorsque seuls A et B se trouvent ensemble dans le seau, A et B ayant des charges de même grandeur et de signe égal, on dit que la charge de C est deux fois supérieure à celle du corps A . Et ainsi de suite.

Chapitre 8

Blindage électrique

8.1 Placer un conducteur ou un isolant entre un corps électrisé et un corps léger

Expérience 8.1 — *Essayer d'attirer des morceaux de papier avec une règle électrisée lorsqu'il y a un tamis métallique entre eux*

Répétez l'expérience de l'effet de l'ambre. Frottez une paille ou une règle en acrylique avec des cheveux, une serviette en papier ou un mouchoir en coton. Supposons que la règle en acrylique frottée attire des morceaux de papier sur une table lorsque leur distance est égale ou inférieure à 5 cm.

Placez un tamis métallique au-dessus des morceaux de papier. Approchez la règle frottée du tamis. Cette fois-ci, les morceaux de papier ne se déplacent pas vers la règle, même lorsque la distance entre la règle et les morceaux de papier est inférieure à 5 cm.

Expérience 8.2 — *Essayer d'attirer des morceaux de papier avec une règle électrisée lorsqu'il y a un tamis en plastique entre eux*

Utilisez maintenant un tamis en plastique. Vérifiez d'abord que le tamis agit bien comme un isolant. Autrement dit, il ne doit pas décharger un électroscope chargé. À partir de maintenant, considérez-le comme un isolant. Recouvrez les morceaux de papier avec ce tamis en plastique. Placez une règle en acrylique frottée au-dessus du tamis. Les morceaux de papier sont attirés par la règle frottée lorsque leur distance est égale ou inférieure à 5 cm. Parfois, l'attraction est légèrement plus faible que dans la situation sans tamis en plastique, de sorte que la distance entre la règle et les morceaux de papier doit désormais être inférieure à 5 cm pour produire une attraction perceptible.

Définition 8.1

Ces expériences montrent qu'en plaçant un conducteur mis à la terre entre un corps électrisé et des morceaux de papier, ces derniers restent immobiles même lorsque le corps électrisé s'en approche. Ce phénomène est appelé « blindage électrostatique », « blindage électrique », « écran électrostatique » ou « écran électrique ».

Le blindage ne fonctionne plus si l'on remplace le conducteur relié à la terre par un isolant. Dans ce cas, les morceaux de papier se déplacent vers le corps électrisé lorsqu'ils sont proches les uns des autres.

Expérience 8.3 — Essayer d'attirer le disque en papier d'un pendule électrique à l'aide d'une règle électrisée lorsqu'une feuille de papier se trouve entre les deux

Utilisez un pendule électrique classique composé d'un disque en papier ou en feuille d'aluminium suspendu à un fil de soie. Il doit être initialement déchargé. Une paille ou une règle en plastique frottée est approchée du pendule. Le disque en papier commence à se déplacer vers la paille frottée lorsque leur distance est d'environ 10 cm, figure 8.1 (a).

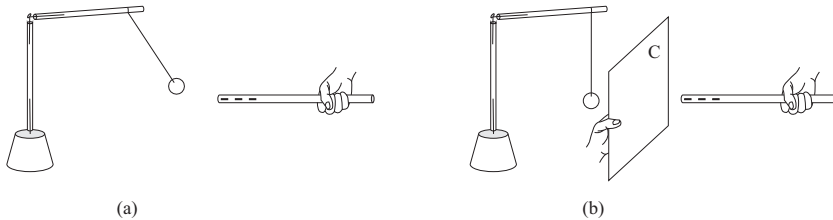


FIG. 8.1 : (a) Un plastique frotté attire le disque en papier d'un pendule électrique situé à proximité. (b) L'attraction disparaît en plaçant une feuille de papier conductrice *C* entre le pendule et le plastique frotté.

Ne laissez pas le disque en papier entrer en contact avec la paille frottée. Cependant, il arrive parfois qu'ils se touchent et que le pendule commence à être repoussé par la paille en raison du mécanisme *ACR*. Si cela se produit, déchargez le pendule en le touchant avec le doigt.

Recommencez avec un pendule déchargé. Cette fois-ci, placez une feuille de papier A4 entre le pendule et la paille frottée. Le papier doit être vertical et ne doit pas toucher le disque, son centre devant se trouver à environ 5 cm du disque du pendule. Approchez lentement la paille ou la règle en plastique frottée du pendule, en laissant le papier entre les deux. Le disque ne se déplace pas vers la paille frottée, même lorsque leur distance est égale à 10 cm ou moins, figure 8.1 (b). Parfois, la feuille de papier est attirée par la paille frottée. Même lorsque cette attraction se produit, le pendule reste verticalement au repos de l'autre côté du papier.

Il n'y aura aucune force nette sur le disque de papier en remplaçant la feuille de papier par un tamis métallique de même taille. Le disque de papier restera au repos lorsqu'il y aura un conducteur mis à la terre entre le disque et le plastique frotté de l'autre

côté. Ce conducteur mis à la terre n'a pas besoin d'être continu. Il peut comporter des trous comme un filet classique, à condition que ces trous ne soient pas très grands.

Expérience 8.4 — *Essayer d'attirer le disque en papier d'un pendule électrique à l'aide d'une règle électrisée lorsqu'une feuille en plastique se trouve entre les deux*

Remplacez la feuille de papier par une feuille de plastique transparent de même taille. Tenez une paille ou une règle en acrylique frottée de l'autre côté de la feuille de plastique. Le disque du pendule est maintenant attiré par la paille frottée lorsqu'ils sont proches l'un de l'autre, figure 8.2.

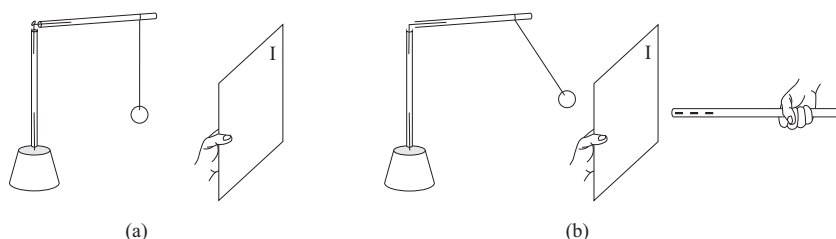


FIG. 8.2 : (a) Une feuille isolante en plastique I proche d'un pendule déchargé. (b) Le disque est attiré par une paille frottée située à proximité, de l'autre côté de la feuille en plastique.

Expérience 8.5 — *Essayer d'attirer le disque en papier d'un pendule électrique à l'aide d'une règle électrisée lorsque le pendule se trouve à l'intérieur d'un récipient en plastique ou en verre*

Nous pouvons réaliser une autre expérience simple et intéressante à l'aide de deux gobelets transparents de même taille et de même forme, l'un en plastique et l'autre en verre. Supposons que nous ayons des gobelets de 6 à 8 cm de diamètre et de 7 à 10 cm de hauteur. Le plastique doit se comporter comme un bon isolant et le verre comme un bon conducteur. Avant de commencer l'expérience, les propriétés isolantes et conductrices du plastique et du verre doivent être testées selon la procédure décrite dans la section 3.1. Chargez un électroscope. Tenez le gobelet en plastique dans votre main et utilisez-le pour toucher le carton. Si l'électroscope reste électrisé pendant plus de 20 secondes, ce gobelet en plastique peut être utilisé dans l'expérience. Répétez la procédure avec le gobelet en verre. Si l'électroscope se décharge en moins de 3 secondes après le contact, ce gobelet en verre peut être utilisé dans l'expérience.

L'expérience doit commencer avec le gobelet en plastique. Fixez un petit disque en papier à l'extrémité d'un fil de soie de 5 cm de long. Fixez l'extrémité libre du fil à l'intérieur du gobelet. Utilisez de la colle ou un petit morceau de ruban adhésif pour la fixer au fond du gobelet. Le fil doit pendre à 1 ou 2 cm d'un côté du gobelet, c'est-à-dire qu'il ne doit pas être situé au centre. Le gobelet est ensuite placé à l'envers sur une table. Le pendule pend verticalement et le disque de papier ne doit toucher ni la table ni le gobelet. Électrifiez une règle en acrylique par friction. Lorsque la règle

électrisée est éloignée du gobelet, le pendule reste vertical, figure 8.3 (a). Rapprochez la règle électrisée de la tasse, à la même hauteur que le disque en papier. Le pendule se déplace vers la règle, touchant le côté de la tasse, figure 8.3 (b). En retirant la règle, le pendule revient à la verticale, figure 8.3 (c).

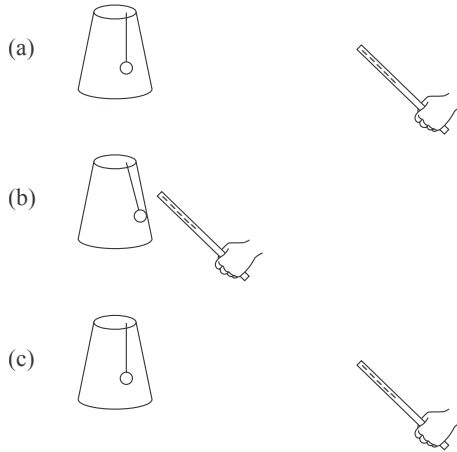


FIG. 8.3 : Gobelet en plastique retourné avec un pendule électrique à l'intérieur. (a) Règle électrisée éloignée du pendule. (b) Lorsque la règle s'approche du gobelet, le disque est attiré et touche le côté du gobelet. (c) En retirant la règle, le pendule revient à la verticale.

Lorsque cette expérience a été couronnée de succès, nous pouvons continuer. Répétez cette procédure avec le gobelet en verre. Cette fois-ci, le pendule reste au repos à la verticale, que la règle électrisée soit proche ou éloignée, figure 8.4.

Le pendule reste également au repos en remplaçant le gobelet en verre par un tamis métallique de même taille et de même forme que le gobelet. Dans ce cas, la main doit se déplacer lentement lorsqu'elle approche la règle électrisée du tamis, afin d'éviter que les courants d'air ne perturbent le pendule. Parfois, le pendule bouge légèrement lorsque la règle électrisée s'approche du tamis, même si elle ne touche pas le côté du tamis, comme c'est le cas dans la figure 8.3 (b).

8.1.1 Quelques anciennes recherches sur le dépistage

Girolamo Cardano (1501–1576) a présenté un catalogue des différences entre les phénomènes électriques et magnétiques dans son ouvrage de 1550. Il a observé que l'aimant naturel attire le fer à travers des objets interposés, tandis que l'ambre frotté n'attire pas les corps légers à travers des objets interposés.¹ William Gilbert a abordé ces phénomènes dans son ouvrage publié en 1600 :^{2,3}

¹[Hei99, p. 174].

²[Gil78, p. 30], [Gil00, pp. 52–53] et [Hei99, p. 174].

³In all bodies everywhere are presented two causes or principles whereby the bodies are produced, to wit, matter (*materia*) and form (*forma*). Electrical movements come from the *materia*, but magnetic from

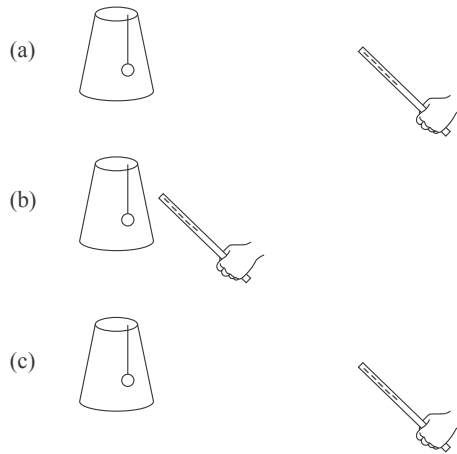


FIG. 8.4 : Gobelet en verre retourné contenant un pendule électrique. (a) Règle électrisée éloignée du pendule. (b) Lorsque la règle s'approche du gobelet, le pendule reste vertical. (c) En retirant la règle, le pendule reste au repos en position verticale.

Dans tous les corps, partout, se présentent deux causes ou principes par lesquels les corps sont produits, à savoir la matière (« *materia* ») et la forme (« *forma* »). Les mouvements électriques proviennent de la « *materia* », mais les mouvements magnétiques proviennent de la « *forma* » première; et ces deux-là diffèrent grandement l'un de l'autre et deviennent dissemblables, l'un ennobli par de nombreuses vertus et prépondérant, l'autre étant humble, moins puissante et confinée dans certaines prisons, pour ainsi dire; c'est pourquoi sa force doit être réveillée par friction jusqu'à ce que la substance atteigne une chaleur modérée, dégage un effluve et que sa surface brille. L'air humide soufflé dessus par la bouche ou un courant d'air humide provenant de l'atmosphère étouffe ses pouvoirs; et si une feuille de papier ou un tissu de lin s'interpose, il n'y a aucun mouvement. Mais le magnétisme, sans être frotté ni chauffé, et même s'il est trempé de liquide, que ce soit dans l'air ou dans l'eau, attire les corps magnétiques, et ce, même si des corps solides ou des planches, ou des dalles épaisses de pierre ou des plaques de métal, s'interposent entre eux.

Honoré Fabri (1607–1688) et les scientifiques de l'Accademia del Cimento (Académie de l'Expérience) ont développé ces expériences entre 1657 et 1667 :^{4,5}

the prime *forma*; and these two differ widely from each other and become unlike,—the one ennobled by many virtues, and prepotent; the other lowly, of less potency, and confined in certain prisons, as it were; wherefore its force has to be awakened by friction till the substance attains a moderate heat, and gives out an effluvium, and its surface is made to shine. Moist air blown upon it from the mouth or a current of humid air from the atmosphere chokes its powers; and if a sheet of paper or a linen cloth be interposed there is no movement. But loadstone, neither rubbed nor heated, and even though it be drenched with liquid, and whether in air or water, attracts magnetic bodies, and that, though solidest bodies or boards, or thick slabs of stone or plates of metal, stand between.

⁴[Hei99, p. 201].

⁵The motive for the investigation of screens was, the Diarist says, to discover 'the resistance sufficient to impede the attraction of amber.' The academicians began by interposing sheets of paper punctured first

Selon le diariste, l'objectif de l'étude des écrans était de découvrir « la résistance suffisante pour empêcher l'attraction de l'ambre ». Les académiciens ont commencé par interposer des feuilles de papier perforées d'abord avec une fine aiguille, puis avec les pointes de ciseaux, et enfin avec un gros clou. Les trous ont grossi, mais l'attraction n'a pas augmenté.

Fabri et les autres scientifiques ont également étudié le blindage des liquides. Ils ont mentionné que l'ambre frotté perd son électricité lorsqu'il est humidifié avec de l'eau, mais la conserve lorsqu'il est recouvert d'huile.⁶

Stephen Gray a mentionné en 1731 une expérience importante réalisée par son ami Granville Wheler (1701–1770). Un tube de verre frotté attirait un fil (probablement un fil de coton ou de lin, c'est-à-dire un matériau conducteur) à travers cinq couches de verre superposées.⁷ Il convient de souligner une fois de plus que les objets en verre utilisés par Gray et ses collaborateurs se comportaient comme de bons isolants.

Gianfrancesco Cigna (1734–1790) a mentionné dans sa thèse de doctorat de 1757 que des attractions se produisent entre des corps chargés immergés dans l'huile. Ce fait a également été discuté par Alessandro Volta.⁸

Tous ces faits importants constituaient des arguments convaincants contre les théories des effluves émis par l'ambre frotté. Ces faits remettaient également en cause l'existence supposée d'atmosphères autour des corps électrisés.⁹

Ces expériences n'ont été pleinement comprises qu'après la découverte des conducteurs et des isolants, de l'existence de deux types d'électricité et des effets de la polarisation électrique dans les conducteurs et les isolants. L'eau, par exemple, se comporte comme un conducteur en électrostatique. L'huile, en revanche, se comporte comme un isolant.

8.2 Expériences avec des conducteurs creux

Réalisez maintenant quelques expériences avec des conducteurs creux, comme celles décrites dans la section 7.2.

Expérience 8.6 — *Essayer d'attirer la bande externe d'une coque cylindrique à l'aide d'une règle électrisée*

Commencez avec une coque cylindrique conductrice isolée et déchargée. Elle doit comporter une ou plusieurs bandes de papier de soie fines dont les extrémités supérieures sont collées sur la paroi externe du cylindre, figure 8.5 (a).

Une paille ou une règle en plastique est chargée négativement par frottement avec des cheveux, une serviette en papier ou un mouchoir en coton. La paille frottée est approchée du cylindre. Pour l'instant, elle ne doit pas toucher le cylindre ni ses bandes.

with a fine needle, then with the points of scissors, finally with a large nail. The holes grew ; the attraction did not.

⁶ [Hei99, pp. 195–196 et 200–201].

⁷ [Gra32c, p. 399], [Bos11, pp. 253–255], [BAC12, pp. 194–199] et [Hei99, p. 249].

⁸ [Hei99, pp. 406, 413 et 415].

⁹ [Hei99, chapitres V et XVII].

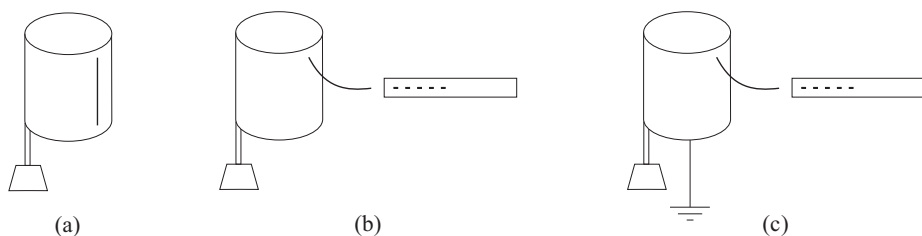


FIG. 8.5 : (a) Coque cylindrique déchargée. (b) La bande externe est attirée par une règle acrylique frottée à proximité. (c) En mettant le cylindre à la terre, l'attraction persiste.

La bande la plus proche est attirée par la paille frottée, figure 8.5 (b). Même lorsque le cylindre est mis à la terre (en touchant son bord supérieur avec un doigt, par exemple), la bande reste attirée par la paille frottée, figure 8.5 (c).

La bande de papier de soie est également attirée par la paille lorsque l'on inverse cette procédure. C'est-à-dire qu'il faut d'abord mettre le cylindre à la terre. Ensuite, on approche la paille frottée de celui-ci.

Expérience 8.7 — *Essayer d'attirer la bande interne d'une coque cylindrique à l'aide d'une règle électrisée*

Répétez l'expérience 8.6, mais cette fois-ci en collant les bandes sur la paroi interne d'une coque cylindrique isolée, figure 8.6 (a).

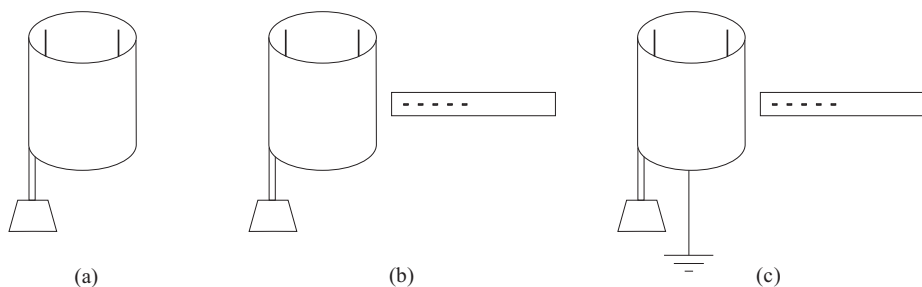


FIG. 8.6 : (a) Coque cylindrique déchargée. (b) Les bandes internes restent immobiles lorsqu'une paille ou une règle en acrylique frottée est approchée du cylindre. (c) Elles restent verticales lorsque le cylindre est mis à la terre.

Approchez une paille ou une règle en acrylique frottée du cylindre. Ses bandes internes restent verticalement au repos, figure 8.6 (b). Elles restent au repos lorsque le cylindre est mis à la terre, figure 8.6 (c).

Les bandes internes restent au repos lorsque la procédure est inversée. C'est-à-dire, mettez le cylindre à la terre, puis approchez la paille frottée de celui-ci.

Expérience 8.8 — *Essayer d'attirer un pendule électrique à l'intérieur d'une coque cylindrique*

Utilisez une coque cylindrique conductrice et isolée initialement déchargée. Le disque en papier conducteur d'un pendule électrique est placé à l'intérieur, près de la paroi mais sans la toucher, entre ses bords supérieur et inférieur. Une paille ou une règle en acrylique frottée est approchée du disque depuis l'extérieur. Le disque ne se déplace pas vers la paille frottée même lorsqu'ils sont proches l'un de l'autre, figure 8.7 (a). Parfois, le bord supérieur du cylindre attire légèrement le fil de soie du pendule. Même dans ce cas, observez que l'attraction agit sur le fil et non sur le disque de papier interne.

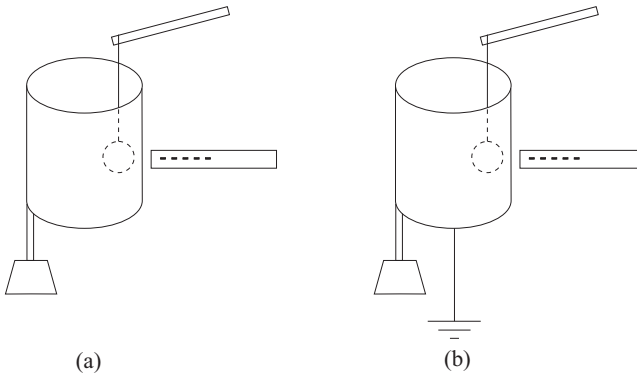


FIG. 8.7 : (a) Le disque en papier d'un pendule électrique ne se déplace pas vers une paille ou une règle en acrylique frottée à proximité. (b) En reliant le cylindre à la terre, le pendule reste immobile à la verticale.

En reliant la coque cylindrique à la terre, le pendule reste immobile à la verticale, figure 8.7 (b).

Expérience 8.9 — *Essayer d'attirer un pendule électrique à l'extérieur d'une coque cylindrique*

Répétez l'expérience 8.8, mais cette fois-ci avec le pendule à l'extérieur de la coque. Le cylindre doit être initialement déchargé et isolé du sol. Le pendule doit être proche de la coque, mais sans la toucher. Le disque en papier doit être placé à mi-chemin entre les bords supérieur et inférieur. Une paille ou une règle en acrylique frottée négativement est lentement approchée de l'autre côté du cylindre, sa partie frottée se trouvant à la même hauteur que le disque en papier. Lorsqu'elle est très proche de la coque, sans la toucher, le disque est attiré par la coque, la touche, puis est repoussé par le mécanisme ACR, figure 8.8.

En étudiant la charge du disque électrisé, nous découvrons qu'elle a le même signe que la charge de la règle électrisée. Parfois, le disque reste attaché au cylindre après le contact. Vous pouvez le faire se détacher en tapotant sur la paille qui soutient le

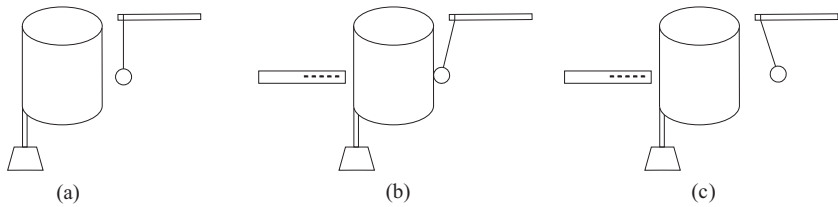


FIG. 8.8 : (a) Un pendule électrique externe proche d'une coque cylindrique. (b) et (c) : Approchez une paille ou une règle en acrylique frottée de l'autre côté du cylindre. Le disque est attiré par le cylindre, le touche, puis est repoussé.

cylindre ou en soufflant doucement sur le disque. Il peut également être détaché en retirant la paille frottée et en la ramenant près de l'autre côté du cylindre.

En revanche, lorsque la coque cylindrique est initialement mise à la terre, le mécanisme ACR ne se produit pas. Approchez la règle acrylique frottée de la coque. Observez que le pendule proche de l'autre côté reste verticalement au repos, figure 8.9.

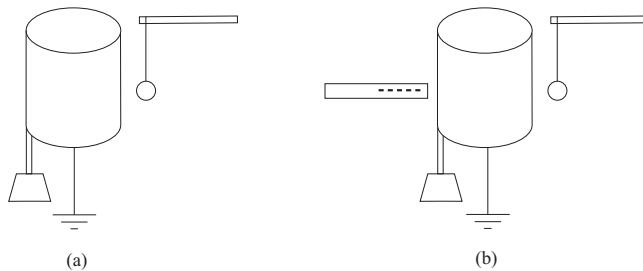


FIG. 8.9 : Le mécanisme ACR ne se produit pas lorsqu'une règle en acrylique frottée est approchée de l'autre côté d'une coque cylindrique initialement mise à la terre.

Expérience 8.10 — Règle électrisée à l'intérieur d'une coque cylindrique et pendule électrique à l'extérieur de celle-ci

Utilisez à nouveau une coque cylindrique conductrice. Elle est isolée et initialement déchargée. La partie frottée d'une règle en plastique chargée négativement est placée à l'intérieur de la coque. Elle doit être proche de la paroi, mais sans la toucher. Le disque du pendule électrique doit se trouver à l'extérieur de la coque, loin de celle-ci et à la même hauteur que la règle électrisée, figure 8.10 (a).

Tenez le pendule par son support ou sa paille, en l'approchant lentement du cylindre. Lorsqu'il est très proche de la coque, son disque est attiré vers la règle en acrylique frottée, touche la coque et est ensuite repoussé par celle-ci grâce au mécanisme ACR, figure 8.10 (b) et (c). En étudiant sa charge, nous obtenons qu'il est désormais électrisé avec des charges du même signe que celles de la règle interne.

Répétez cette expérience, mais cette fois-ci avec la coque cylindrique initialement mise à la terre. Approchez le pendule de la règle en acrylique frottée. Observez que

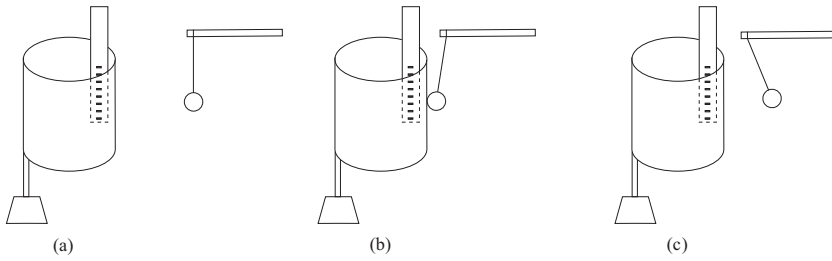


FIG. 8.10 : (a) Pendule électrique éloigné d’une coque cylindrique isolée avec une règle acrylique électrisée à l’intérieur. (b) et (c) : Lorsque le pendule est approché de la règle, il est attiré vers la coque, la touche, puis est repoussé.

le pendule reste vertical. Autrement dit, son disque ne subit pas le mécanisme *ACR*, figure 8.11.

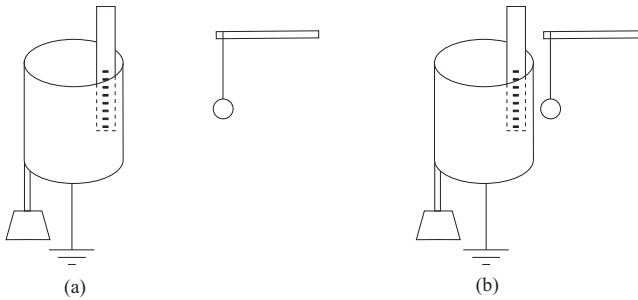


FIG. 8.11 : (a) Pendule électrique éloigné d’une coque cylindrique mise à la terre avec une règle acrylique électrisée à l’intérieur. (b) Lorsque le pendule est rapproché de la règle, il n’est pas attiré vers celle-ci.

8.3 Conditions suffisantes pour un blindage efficace

Cette sous-section traite de certaines situations dans lesquelles il existe un blindage efficace et d’autres situations dans lesquelles il n’y en a point.

L’expérience 7.15 utilise une coque cylindrique isolée et conductrice. La figure 7.18 (b) montre que lorsqu’une règle électrisée est placée à l’intérieur, les bandes situées à l’extérieur du cylindre se soulèvent. Cependant, lorsque le cylindre est mis à la terre, les bandes retombent, malgré la présence de la règle électrisée à l’intérieur, figure 7.18 (c). Par conséquent, un conducteur fermé et mis à la terre protège à l’extérieur les effets qui seraient produits par le corps électrisé interne si la coque était isolée de la terre.

Le même comportement peut être observé dans l’expérience 8.10 en comparant les figures 8.10 et 8.11. Un conducteur fermé possède une charge interne. Lorsque

le conducteur est isolé, il affecte le disque d'un pendule qui s'en approche, produisant le mécanisme *ACR*. Cependant, lorsque le conducteur est mis à la terre, le mécanisme *ACR* ne se produit pas, même lorsque le pendule électrique est proche du cylindre.

Dans l'expérience 8.6, figures 8.5 et 8.6, il y a une coque cylindrique conductrice avec une charge externe (la règle acrylique frottée). Lorsque la règle électrisée s'approche du cylindre, les bandes de papier de soie externes sont affectées par celle-ci, que le cylindre soit isolé ou mis à la terre. Les bandes internes, en revanche, ne sont pas affectées, que le cylindre soit isolé ou mis à la terre.

Ce comportement peut également être observé avec le pendule électrique de l'expérience 8.8. Nous avons une coque cylindrique conductrice avec la règle acrylique frottée à l'extérieur. Le pendule électrique se trouve à l'intérieur du cylindre. Son disque est proche d'un de ses côtés, sans le toucher, situé à mi-chemin entre les bords supérieur et inférieur. Même lorsque la règle électrisée est approchée du cylindre, il n'y a pas de force nette sur le disque, car il reste au repos, figure 8.7. Que le cylindre soit isolé ou mis à la terre, il n'y a pas de force nette sur le disque interne.

Dans l'expérience 8.9, la règle en acrylique frottée se trouve à l'extérieur d'une coque conductrice isolée. Elle affecte un pendule électrique externe situé de l'autre côté du cylindre. Lorsque la règle frottée est approchée du cylindre, le disque du pendule suit le mécanisme *ACR*, figure 8.8. En revanche, pour une coque cylindrique mise à la terre, le mécanisme *ACR* ne se produit pas, figure 8.9.

Nous concluons en disant qu'il n'y a pas d'effets nets sur les corps électrisés à l'extérieur lorsqu'il y a des charges situées à l'intérieur d'un conducteur fermé et mis à la terre (par effet net, nous entendons un effet résultant ou total). Dans cette situation, un blindage électrique efficace se produit. Il n'y a pas non plus d'effets nets sur les charges internes lorsqu'il y a des corps électrisés à l'extérieur d'un conducteur fermé, que ce dernier soit isolé ou mis à la terre.

Cependant, il y a des effets nets sur les charges externes lorsqu'il y a des corps électrisés à l'intérieur d'un conducteur isolé et fermé.

Ces comportements peuvent s'expliquer par la distribution de charges réparties sur les surfaces internes et externes des conducteurs creux. Considérons d'abord le blindage qui se produit à l'extérieur d'un conducteur fermé et isolé avec une charge interne. Considérons le conducteur comme une sphère creuse initialement déchargée et isolée de la terre. Supposons qu'une charge négative nette $-Q$ soit située à l'intérieur de la coque. La présence de cette charge polarise la coque. Sa paroi interne devient électrisée positivement, tandis que sa paroi externe devient électrisée négativement, figure 8.12 (a). En mettant le conducteur à la terre, nous neutralisons la distribution des charges sur sa paroi externe, figure 8.12 (b).

Supposons la présence d'un corps chargé positivement d'une charge q et situé à l'extérieur du conducteur mis à la terre de la figure 8.12 (b). Supposons que $q \ll Q$ et négligeons la polarisation des charges induites sur le conducteur en raison de la présence de cette charge externe q . Deux forces agissent sur le corps externe, à savoir la force d'attraction F_A exercée par le corps interne chargé négativement de la charge $-Q$ et la force de répulsion F_R exercée par toutes les charges réparties sur la paroi interne du conducteur. Ces deux forces ont la même intensité mais agissent dans des directions opposées. Elles s'annulent mutuellement, figure 8.13.

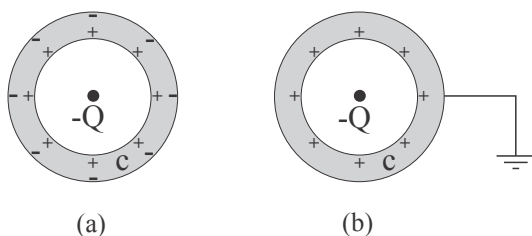


FIG. 8.12 : (a) Conducteur isolé c polarisé en raison de la présence d'une charge négative interne $-Q$. (b) Conducteur mis à la terre avec paroi externe neutralisée.

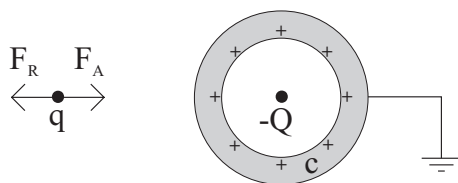


FIG. 8.13 : Forces d'attraction et de répulsion, F_A et F_R , agissant sur le corps chargé d'une charge q .

Important : seule la « force nette ou résultante » agissant sur la charge q située à l'extérieur du conducteur mis à la terre tend vers zéro. Malgré cela, la présence du conducteur n'élimine pas la force d'attraction F_A exercée par la charge interne $-Q$. Lorsque le conducteur est mis à la terre, il existe également une force de répulsion F_R due aux charges positives réparties sur la paroi interne de la coque sphérique. Ces deux forces ont la même intensité mais des directions opposées, et s'annulent donc mutuellement.

La figure 8.14 (a) montre la force d'attraction F_A exercée par $-Q$ sur q séparés par une distance d lorsqu'il n'y a pas d'autres corps entre ces charges. Lorsqu'il y a un conducteur mis à la terre autour de $-Q$, comme dans la figure 8.14 (b), la force d'attraction exercée par $-Q$ sur q reste exactement la même qu'auparavant, avec la même intensité et la même direction, à condition que $-Q$ et q restent à la même distance d . Cependant, la « force résultante » agissant sur q devient nulle dans la dernière situation en raison de la présence de la force répulsive F_R exercée par les charges positives réparties sur la paroi interne du conducteur. Cette force répulsive F_R n'a pas été représentée dans la figure 8.14 (b). La force de réaction exercée par q sur $-Q$ est donnée par $-F_A$, où F_A a été représentée dans la figure 8.14 (a) et (b). La force de réaction $-F_A$ n'a pas été représentée dans cette figure.

Considérons le blindage qui se produit à l'intérieur d'un conducteur fermé lorsqu'il y a un corps électrisé à l'extérieur de celui-ci, le conducteur lui-même étant isolé ou mis à la terre. Supposons à nouveau un conducteur sphérique initialement déchargé et isolé. Nous considérons la situation dans laquelle un corps électrisé négativement avec une charge $-Q$ est situé à l'extérieur de la coque. Ce corps externe polarise la paroi externe de la coque isolée, figure 8.15 (a). En mettant la coque à la terre, nous

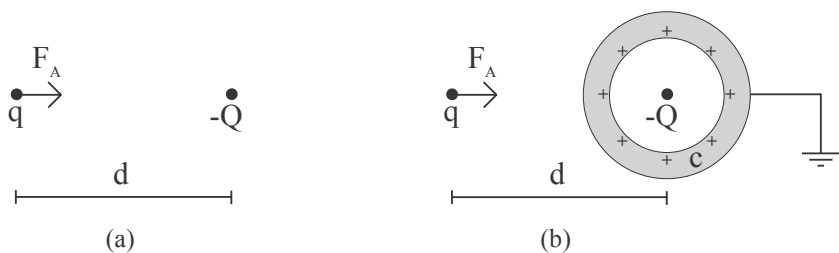


FIG. 8.14 : (a) Force d'attraction F_A exercée par $-Q$ sur q séparés par une distance d lorsqu'il n'y a aucun corps entre eux. (b) La force d'attraction F_A exercée par $-Q$ sur q reste la même lorsqu'il y a un conducteur mis à la terre autour de $-Q$, à condition que $-Q$ et q restent séparés par la même distance d .

neutralisons les charges initialement réparties sur la paroi externe près de la position de mise à la terre. De plus, les autres charges restant à la surface de la coque sont désormais réorganisées (par rapport à la distribution précédente des charges sur la sphère isolée), figure 8.15 (b).

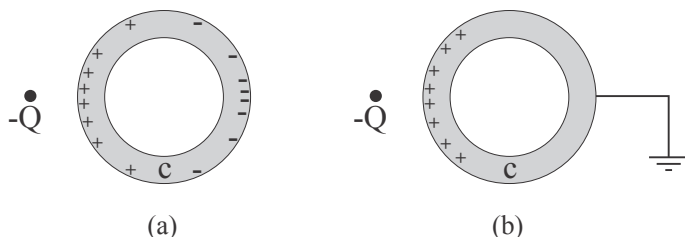


FIG. 8.15 : (a) Conducteur isolé c dont la paroi externe est polarisée en raison de la présence d'un corps négatif $-Q$ à l'extérieur. (b) Conducteur mis à la terre montrant la neutralisation des charges à proximité du point de mise à la terre et une redistribution des charges restantes.

Supposons maintenant la présence d'un corps chargé positivement d'une charge q à l'intérieur du conducteur de la figure 8.15 (a). Une fois de plus, nous supposons que $q \ll Q$ et négligeons la polarisation induite dans la coque par la présence de cette charge interne q . Trois forces agissent sur le corps positif chargé de la charge q , à savoir la force d'attraction F_A dirigée vers la gauche et exercée par le corps négatif externe chargé de la charge $-Q$, la force répulsive F_1 pointant vers la droite et exercée par les charges positives réparties sur la paroi externe du conducteur, ainsi que la force d'attraction F_2 pointant vers la droite et exercée par les charges négatives réparties sur la paroi externe du conducteur. Ces trois forces s'équilibrent mutuellement, de sorte que $|\vec{F}_A| = |\vec{F}_1 + \vec{F}_2|$, ce qui ne produit aucune force résultante sur la charge interne q , figure 8.16 (a).

En ce qui concerne le conducteur mis à la terre de la figure 8.15 (b), il existe deux forces égales et opposées agissant sur la charge interne q , à savoir la force d'attrac-

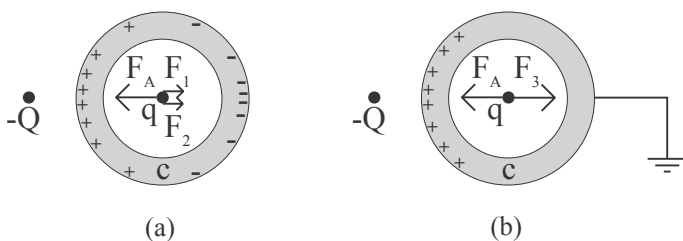


FIG. 8.16 : (a) Forces agissant sur la charge q située à l'intérieur du conducteur isolé de la figure 8.15 (a), $|\vec{F}_A| = |\vec{F}_1 + \vec{F}_2|$. (b) Forces agissant sur la charge q située à l'intérieur du conducteur mis à la terre de la figure 8.15 (b), $|\vec{F}_A| = |\vec{F}_3|$.

tion F_A pointant vers la gauche et exercée par la charge externe $-Q$, ainsi que la force de répulsion F_3 pointant vers la droite et exercée par les charges positives réparties sur la paroi externe du conducteur, figure 8.16 (b). Ces deux forces ont la même intensité mais des directions opposées, s'annulant mutuellement, $|\vec{F}_A| = |\vec{F}_3|$.

La « force nette ou résultante » agissant sur la charge interne q tend vers zéro dans les deux situations de la figure 8.16. Cependant, il est important de souligner ici que la force d'attraction exercée par $-Q$ sur q reste toujours la même, indépendamment de la présence ou de l'absence du conducteur autour de q . La force d'attraction F_A exercée par $-Q$ sur q a toujours la même valeur, quelle que soit la répartition des charges sur la paroi externe du conducteur. Le conducteur peut être isolé ou mis à la terre, cela n'a pas d'importance. La force d'attraction entre $-Q$ et q reste toujours la même. La présence du conducteur n'élimine pas cette force d'attraction exercée par $-Q$ sur q . Cependant, la présence du conducteur permet une redistribution des charges sur sa paroi extérieure. La force exercée par ces charges de surface sur q a la même intensité que la force exercée par $-Q$ sur q , mais agit dans la direction opposée, de sorte qu'elles s'annulent mutuellement.

La figure 8.17 (a) montre la force d'attraction F_A exercée par $-Q$ sur q séparés par une distance d lorsqu'il n'y a pas d'autres corps entre eux. Cette force reste la même lorsqu'il y a un conducteur isolé autour de q , figure 8.17 (b). La force d'attraction F_A exercée par $-Q$ sur q reste également la même qu'auparavant lorsqu'il y a un conducteur mis à la terre autour de q , figure 8.17 (c). Cette figure ne montre pas les forces agissant sur q dues aux charges réparties sur la paroi externe du conducteur. La force de réaction exercée par q sur $-Q$ est donnée par $-F_A$ dans les situations (a), (b) et (c) de la figure 8.17. Cette force de réaction n'est pas non plus représentée dans la figure.

Les figures 8.13 et 8.14 montrent que la présence d'un conducteur mis à la terre produit un « blindage efficace ». Il n'y a pas de « force nette ou résultante » agissant sur une particule électrisée située à l'extérieur d'un conducteur mis à la terre lorsqu'il y a un corps électrisé à l'intérieur de celui-ci. Cependant, il n'y a pas de « blindage réel » de la force exercée par le corps électrisé interne agissant sur le corps externe. Cette force reste toujours la même, que le conducteur mis à la terre soit présent ou absent. La même conclusion peut être tirée en comparant les figures 8.16 et 8.17. Dans cette dernière situation, il existe également un « blindage efficace », car la « force nette ou

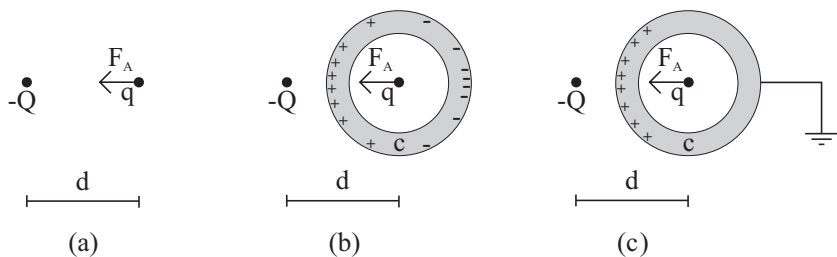


FIG. 8.17 : (a) Force d'attraction F_A exercée par $-Q$ sur q séparés par une distance d lorsqu'il n'y a pas d'autres corps entre eux. (b) Cette force reste la même lorsqu'il y a un conducteur isolé autour de q . (c) Cette force reste exactement la même lorsqu'il y a un conducteur mis à la terre autour de q .

résultante » agissant sur un corps à l'intérieur d'un conducteur mis à la terre tend vers zéro. Cependant, une fois de plus, il n'y a pas de « blindage réel » de la force exercée par la charge externe agissant sur le corps électrisé à l'intérieur. Cette dernière force agit toujours avec la même intensité, que le conducteur mis à la terre soit présent ou absent.¹⁰

8.4 Cage de Faraday

Michael Faraday a réalisé des expériences très intéressantes à l'aide d'un appareil communément appelé « cage de Faraday ». Il s'agit d'un conducteur creux. Voici ses propres mots pour décrire ses observations :^{11,12}

1173. J'ai mené ces expériences avec l'air à très grande échelle. J'ai fait construire une chambre cubique de douze pieds [27 m³]. Un léger cadre cubique en bois a été construit, et du fil de cuivre a été passé dans différentes directions, de manière à former un grand réseau sur les côtés, puis le tout a été recouvert de papier, placé en

¹⁰[Roc89].

¹¹[Far38, paragraphes 1173–1174, pp. 442–443].

¹²1173. I carried these experiments on with air to a very great extent. I had a chamber built, being a cube of twelve feet. A slight cubical wooden frame was constructed, and copper wire passed along and across it in various directions, so as to make the sides a large net-work, and then all was covered in with paper, placed in close connexion with the wires, and supplied in every direction with bands of tin foil, that the whole might be brought into good metallic communication, and rendered a free conductor in every part. This chamber was insulated in the lecture-room of the Royal Institution; [...]

1174. I put a delicate gold-leaf electrometer within the cube, and then charged the whole by an *outside* communication, very strongly, for some time together; but neither during the charge or after the discharge did the electrometer or air within show the least signs of electricity. I charged and discharged the whole arrangement in various ways, but in no case could I obtain the least indication of an absolute charge; or of one by induction in which the electricity of one kind had the smallest superiority in quantity over the other. I went into the cube and lived in it, and using light candles, electrometers, and all other tests of electrical states, I could not find the least influence upon them, or indication of anything particular given by them, though all the time the outside of the cube was powerfully charged, and large sparks and brushes were darting off from every part of its outer surface. The conclusion I have come to is that non-conductors, as well as conductors, have never yet had an absolute and independent charge of one electricity communicated to them, and that to all appearance such a state of matter is impossible.

contact étroit avec les fils, et muni dans toutes les directions de bandes de la feuille d'étain, afin que l'ensemble puisse être mis en bonne communication métallique et devienne un conducteur libre dans toutes ses parties. Cette chambre était isolée dans la salle de conférence de la Royal Institution ; [...]

1174. J'ai placé un électromètre délicat à feuille d'or à l'intérieur du cube, puis j'ai chargé l'ensemble par une communication *extérieure*, très fortement, pendant un certain temps ; mais ni pendant la charge ni après la décharge, l'électromètre ou l'air à l'intérieur n'ont montré le moindre signe d'électricité. J'ai chargé et déchargé l'ensemble de divers manières, mais je n'ai jamais pu obtenir la moindre indication d'une charge absolue, ni d'une charge par induction dans laquelle l'électricité d'un type aurait eu la moindre supériorité quantitative sur l'autre. Je suis entré dans le cube et j'y ai vécu, et en utilisant des bougies allumées, des électromètres et tous les autres tests d'états électriques, je n'ai pu trouver la moindre influence sur eux, ni aucune indication particulière donnée par eux, bien que l'extérieur du cube ait été puissamment chargé pendant tout ce temps et que de grandes étincelles et des brosses jaillissent de toutes les parties de sa surface extérieure. La conclusion à laquelle je suis parvenu est que les non-conducteurs, tout comme les conducteurs, n'ont encore jamais reçu de charge électrique absolue et indépendante, et qu'à première vue, un tel état de la matière est impossible.

Les expériences de la section 8.1 sont liées à ces phénomènes observés par Faraday. En particulier, il n'y a pas d'« effets nets, totaux ou résultants » à l'intérieur d'un conducteur fermé en raison de la présence de charges à la surface du conducteur ou situées à l'extérieur du conducteur.

Chapitre 9

L'effet de pointe

Il existe plusieurs effets électriques qui sont plus intenses dans les régions pointues des conducteurs que dans les régions émoussées ou moins pointues. Certains de ces effets reçoivent une dénomination générique, à savoir « l'effet de pointe ». Nous énumérons ici quelques-uns de ces phénomènes :

1. Les particules électrisées s'accumulent avec une densité de surface plus élevée dans les régions pointues des conducteurs électrisés ou polarisés.
2. Les corps légers situés sur les régions pointues des conducteurs sont attirés avec une force plus grande par un autre corps électrisé.
3. Les régions pointues des conducteurs sont attirées ou repoussées avec une plus grande intensité par d'autres corps électrisés.

Nous illustrons ces propriétés à l'aide de quelques expériences simples.

9.1 Illustrer l'effet de pointe à l'aide d'électroscopes

Vous pouvez visualiser l'effet de pointe à l'aide d'électroscopes simples fabriqués à partir de carton fin. Leur forme doit ressembler à celle d'une raquette de tennis, d'une planche à découper ou d'un chapeau de clown pointu.¹ Nous suggérons ici une taille spécifique, bien que l'aspect le plus important pour ces expériences soit la forme asymétrique du carton et non sa taille. Le carton est fixé à une paille en plastique à l'aide de deux morceaux de ruban adhésif, comme pour un électroscope simple. Découpez deux très petites bandes de papier de soie, de 1 à 3 mm de large et de 6 à 9 cm de long. Elles doivent avoir la même taille et la même épaisseur. Collez les extrémités supérieures de ces bandes sur l'électroscope. L'une d'elles est collée sur la partie pointue du carton et l'autre sur sa partie la plus large, figure 9.1.

¹[FM91, pp. 60–61], [Fersdb, Poder das pontas, p. 39] et [Gas03, pp. 239–243].

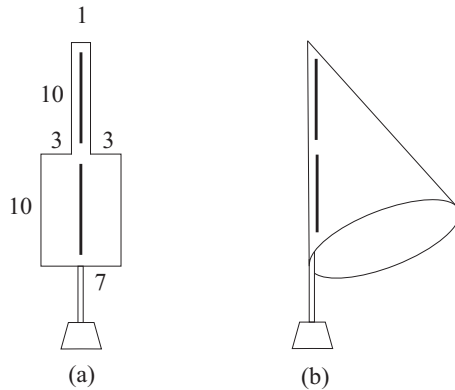


FIG. 9.1 : (a) Électroscope en forme de planche à découper. Dimensions approximatives en centimètres. (b) Électroscope en forme de chapeau de clown.

Expérience 9.1 — *Chargement d'un électroscope asymétrique*

Frottez vigoureusement une paille ou une règle en acrylique dans des cheveux ou sur une feuille de papier. Raclez plusieurs fois la paille ainsi chargée sur le bord supérieur de ces électrosopes jusqu'à ce qu'ils acquièrent une charge électrique suffisante, comme l'indiquent les bandes relevées. Éloignez la paille frottée de l'électroscope. Observez que les bandes de papier de soie situées sur les parties pointues des électrosopes sont plus hautes que les autres bandes. Autrement dit, elles acquièrent des angles d'inclinaison plus élevés par rapport à leur carton que les autres bandes situées sur les mêmes électrosopes, figure 9.2.

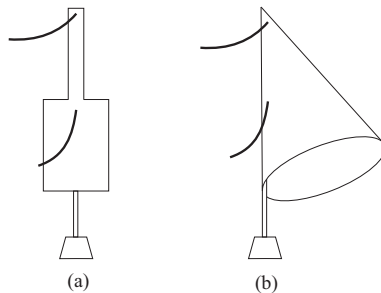


FIG. 9.2 : Électrosopes chargés. Les bandes situées sur les régions pointues sont plus inclinées que les autres bandes.

Le volume 1 de cet ouvrage a montré que l'angle d'inclinaison de la bande de papier de soie d'un électroscope est un indicateur qualitatif de l'électrisation de l'électroscope, c'est-à-dire de sa densité de charge superficielle.² Plus il est électrisé, plus sa bande sera relevée.

²Expérience 6.9 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

À partir de la présente expérience, nous concluons que la densité de charge superficielle sur la région pointue d'un électroscope chargé est supérieure à la densité de charge superficielle sur la région émoussée, comme indiqué dans la figure 9.3.

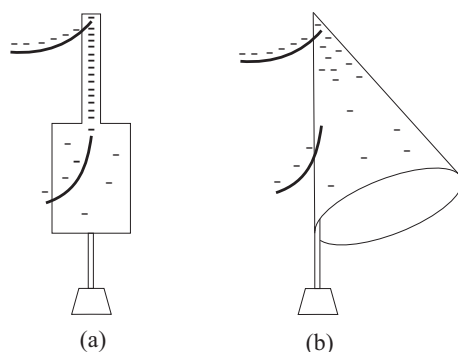


FIG. 9.3 : Charges concentrées sur les pointes des électroscopes électrisés.

Expérience 9.2 — Chargement d'une longue bande de papier rectangulaire

Découpez un morceau de carton de 10 cm de large et de 1 à 2 m de long. À la place du carton, vous pouvez également utiliser des rectangles provenant de papier A4 de 10 cm de large agrafés ensemble afin d'obtenir une longueur de 1 à 2 m. Les pailles doivent être fixées sur ce long rectangle à l'aide de ruban adhésif de manière à ce que la moitié de leur longueur dépasse du rectangle. Les pailles sont ensuite fixées sur des supports appropriés afin que le carton reste dans un plan vertical. Collez les extrémités supérieures de quelques bandes de papier de soie fin sur toute la longueur du carton, comme indiqué dans la figure 9.4.



FIG. 9.4 : Rectangle en carton de 10 cm de large et 1 m de long avec plusieurs bandes de papier de soie fin.

Électrisez ce rectangle en raclant plusieurs fois une règle en plastique sur le bord supérieur du carton. Une fois la règle retirée, observez que les bandes situées sur les bords du rectangle sont plus hautes que celles du milieu, figure 9.5 (a). Cela indique qu'il y a une concentration plus élevée de charges sur les bords du rectangle, figure 9.5 (b).

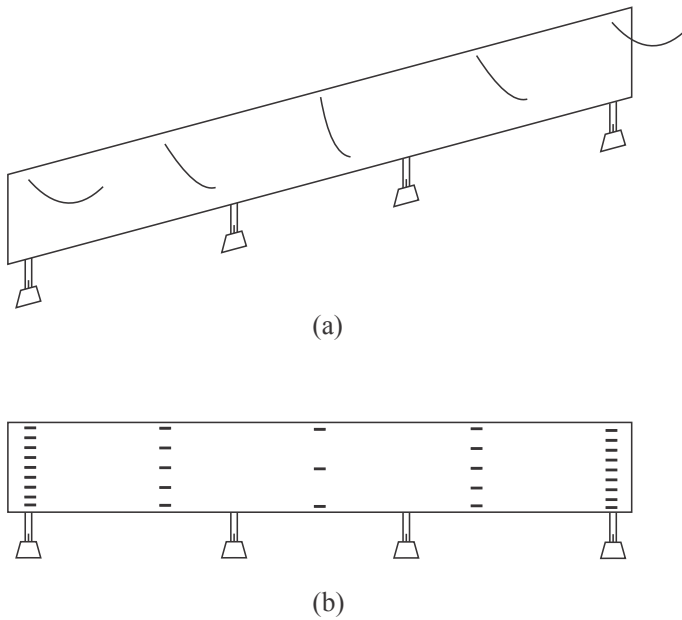


FIG. 9.5 : (a) Les bandes situées sur les bords sont plus hautes que celles situées au milieu du rectangle. (b) Répartition qualitative des charges sur le rectangle.

9.2 Collecte et comparaison des densités de charge superficielle

Expérience 9.3 — Collecte des charges superficielles d'un électroscope asymétrique

Vous pouvez comparer plus facilement les densités de charge superficielle situées dans différentes régions d'un électroscope chargé en utilisant des collecteurs de charge appropriés. Un exemple est le plan de preuve de Coulomb représenté dans la figure 2.17 de la section 2.6. Il peut s'agir d'un disque en carton de 1 cm de diamètre auquel est reliée, au centre, une paille en plastique de 4 cm de long à l'aide de colle ou de pâte à modeler. Estimez qualitativement la quantité de charge collectée par le plan de preuve en comparant la plus petite distance à laquelle il doit être amené pour affecter les bandes relevées de deux autres électroscopes, l'un chargé positivement et l'autre négativement. Ces deux électroscopes doivent être séparés l'un de l'autre et éloignés du conducteur asymétrique isolé et électrisé. Après avoir collecté les charges provenant de différentes régions de ce conducteur asymétrique, rapprochez lentement le plan de preuve des bandes relevées des électroscopes. Estimez la distance critique à laquelle ces bandes commencent à être attirées ou repoussées par le plan de preuve. Plus ces distances critiques sont grandes, plus le plan de preuve est électrisé.

Comme conducteur asymétrique, utilisez l'électroscope à planche à découper de la figure 9.1 (a). Retirez ses bandes de papier de soie, comme dans la figure 9.6 (a).

Un autre exemple de conducteur asymétrique est un rectangle de papier de 10 cm

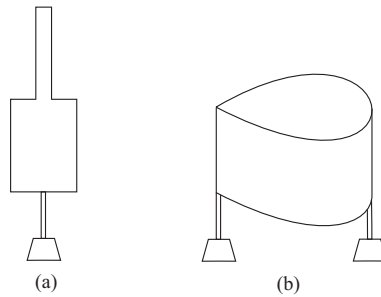


FIG. 9.6 : Conducteurs asymétriques isolés du sol par des pailles en plastique

de large et 60 cm de long soutenu par trois ou quatre pailles en plastique fixées sur des supports appropriés. Collez ou fixez les deux bords de cette bande flexible afin de lui donner une forme de goutte, figure 9.6 (b).

Électrisez l'électroscope à planche à découper en raclant son carton avec une règle en acrylique ou une paille frottée. Commencez par collecter les charges de la poignée de cet électroscope à l'aide du plan de preuve, comme dans la figure 9.7 (a). Tenez le plan de preuve chargé uniquement par sa paille isolante. Approchez-le ensuite d'un électroscope chargé positivement. Mesurez la distance critique entre le plan de preuve chargé et cet électroscope afin d'influencer sa bande relevée. Répétez cette procédure, mais en approchant cette fois le plan de preuve chargé d'un électroscope chargé négativement.

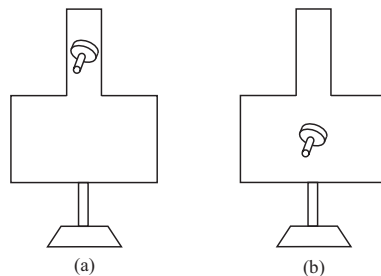


FIG. 9.7 : (a) Collecte des charges à partir de la poignée d'un conducteur asymétrique. (b) Collecte des charges à partir du centre de la planche.

Recueillez maintenant les charges au centre de la planche, comme dans la figure 9.7 (b). Approchez le plan de preuve chargé des électroscopes chargés positivement et négativement, en mesurant à nouveau les distances critiques nécessaires pour affecter leurs bandes relevées.

Comparez les distances critiques dans la première situation (charge collectée à partir de la poignée de l'électroscope) et dans la deuxième situation (charge collectée à partir du centre de la planche). Vérifiez que les distances critiques dans la première situation sont plus grandes que dans la seconde. Cela indique que la densité de charge superficielle est plus importante sur la poignée de l'électroscope que sur sa planche,

comme le montre la figure 9.3 (a).

La même conclusion s'applique au conducteur asymétrique en forme de goutte. Autrement dit, la quantité de charges collectées à partir de la partie pointue de la goutte est supérieure à celle collectée à partir de la partie éoussée, figure 9.8. La densité de charge superficielle est plus importante sur la partie pointue de la goutte que sur sa partie éoussée.

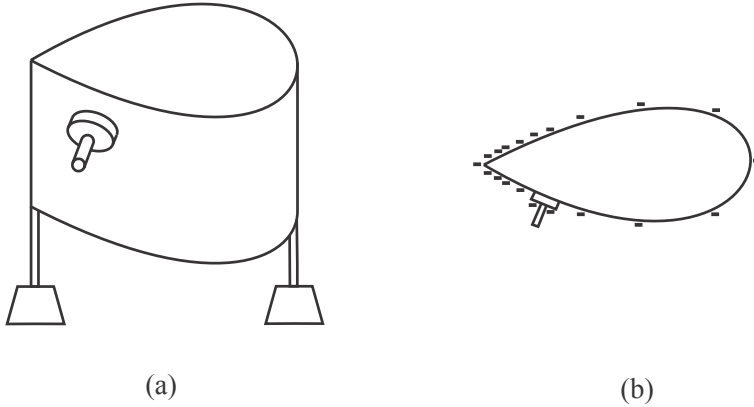


FIG. 9.8 : (a) Plan de preuve sur un conducteur asymétrique. (b) Répartition qualitative des charges sur ce conducteur.

Expérience 9.4 — *Collecte des charges superficielles d'une longue bande de papier*

Le plan de preuve peut également collecter directement les charges provenant de différentes régions du rectangle de 10 cm de large et de 1 à 2 m de long de l'expérience 9.2. Les fines bandes de papier de soie de ce rectangle empêchent la collecte des charges. Pour éviter ce problème, éliminez toutes les bandes de papier de soie. Vous pouvez également n'éliminer que la moitié des bandes, à savoir celles situées sur le côté droit du rectangle où le collecteur sera placé. Conservez les bandes situées à gauche du rectangle afin d'indiquer quand celui-ci a acquis une électrisation suffisante. Après avoir collecté les charges de n'importe quelle région du rectangle, approchez le collecteur d'un électroscope chargé positivement et mesurez la plus petite distance nécessaire pour affecter la bande de cet électroscope. Cette procédure peut également être répétée avec un électroscope chargé négativement. Comparez ces distances critiques pour les plans de preuve chargés provenant de différentes régions du rectangle. Concluez que les collecteurs électrisés provenant des bords du rectangle ont acquis une plus grande quantité de charge que ceux provenant des régions centrales du rectangle électrisé, figure 9.5 (b).

Parfois, les résultats de ces expériences ne sont pas très clairs. Tout d'abord, les densités de charge superficielle de plusieurs régions d'un même conducteur asymétrique peuvent ne pas être très différentes les unes des autres. De plus, il n'est pas facile

de mesurer avec précision la distance critique entre le plan de preuve chargé et un électroscope électrisé afin d'attirer ou de repousser sa bande relevée. Afin de faciliter la mesure de cette distance, déplacez lentement le collecteur chargé avec un mouvement de va-et-vient devant la bande relevée de l'électroscope chargé. Vous pourrez alors observer plus facilement quand les mouvements coordonnés de va-et-vient ont lieu.

9.3 Gray et l'effet de pointe

Stephen Gray a présenté en 1731 la première description de ce qu'on appelle « l'effet de pointe ». ³ Il a posé de fines feuilles de laiton à trois endroits différents, à savoir sur le sol, sur un cylindre en bois de 30 cm de diamètre et 30 cm de haut, et également au sommet d'un support conique de 30 cm de haut, avec un diamètre supérieur de 7,6 cm et un diamètre inférieur de 11,4 cm. Il a essayé d'attirer ces feuilles de laiton à l'aide d'un tube de verre électrisé qu'il a approché d'elles. Lorsque les feuilles de laiton étaient posées sur ce support conique, il a constaté qu'elles étaient attirées à une hauteur beaucoup plus grande que lorsqu'elles étaient posées sur une table, et au moins trois fois plus haute que lorsqu'elles étaient posées sur le sol d'une pièce. La figure 9.9 représente une description qualitative de cette expérience.

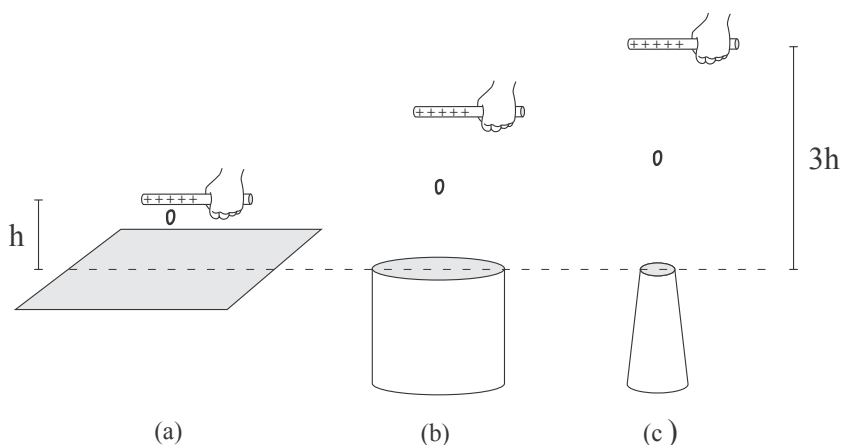


FIG. 9.9 : (a) Une feuille de laiton légère est attirée à une hauteur h à partir de sa position initiale au sol. (b) Elle s'élève plus haut lorsqu'elle est posée sur une table ou sur un cylindre conducteur de 30 cm de diamètre. (c) Lorsqu'elle se trouve au sommet d'un conducteur conique, elle est attirée trois fois plus haut que lorsqu'elle est au sol.

Expérience 9.5 — Reproduction de l'expérience de Gray

L'expérience de Gray peut être facilement reproduite. Approchez une règle en acrylique frottée de morceaux de papier et mesurez la distance critique à laquelle

³Section B.9 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

les morceaux de papier sont attirés par la règle. Dans la première situation, ils sont posés au centre d'une feuille de papier A4. Dans la deuxième situation, ils sont posés au centre d'un cylindre en papier de 4 cm de diamètre et 10 cm de hauteur. Dans la troisième situation, ils sont posés sur le sommet d'un cône en papier de 6 cm de base et 10 cm de hauteur. Coupez la pointe du cône et remplacez-la par un petit disque horizontal en papier d'environ 0,5 cm de diamètre. Ce disque est collé sur le cône. Vous pouvez ensuite poser les morceaux de papier sur le sommet plat de ce cône afin de réaliser l'expérience. Le cône et le cylindre doivent être fabriqués à partir du même papier A4 que la feuille de papier plane de la première situation. La feuille de papier de la première situation doit être posée au-dessus de trois ou quatre colonnes de papier ou au-dessus de trois ou quatre cylindres de papier. Pour commencer l'expérience, cette feuille de papier, la partie supérieure du cylindre et la partie supérieure du cône doivent être à la même hauteur, c'est-à-dire situées dans le même plan horizontal. Ces trois supports doivent être séparés les uns des autres.

Frottez une règle en acrylique et amenez-la lentement au-dessus des morceaux de papier posés sur la feuille de papier plane. La règle doit être en position horizontale. Remarquez qu'ils commencent à se déplacer vers la règle lorsqu'elle se trouve à environ 2 cm au-dessus de la feuille de papier. Lorsque les morceaux de papier sont posés sur le cylindre, ils commencent à se déplacer lorsque la règle se trouve à 4 cm du haut du cylindre. Lorsque les morceaux de papier sont placés sur le cône, ils commencent à se déplacer à une distance critique d'environ 6 cm entre la règle et la pointe du cône.

Ces distances ne sont qu'approximatives. Elles dépendent du degré d'électrification de la règle, de l'humidité de l'air, ainsi que de la forme, de la taille et du poids des morceaux de papier. Quoi qu'il en soit, cette expérience montre clairement que le mouvement des morceaux de papier se produit à des distances plus importantes lorsqu'ils sont posés sur des surfaces pointues. En revanche, lorsqu'ils sont posés sur une feuille de papier plane, la règle en acrylique frottée doit être beaucoup plus proche d'eux pour produire le mouvement des morceaux de papier. Dans ces trois situations, les morceaux de papier ont été posés sur des supports faits du même matériau, à savoir une feuille de papier A4 conductrice. Les différentes valeurs des distances critiques nécessaires pour produire le mouvement ne peuvent être dues qu'aux différentes formes de ces supports.

Expérience 9.6 — *Règle électrisée placée sous une feuille, un cylindre et un cône en papier*

Placez trois feuilles de plastique (de la taille d'une feuille de papier A4) sur 3 ou 4 cylindres en papier de 10 cm de haut. Les trois feuilles de plastique doivent être à la même hauteur au-dessus du sol. Posez les trois supports de l'expérience 9.5 (à savoir la feuille de papier, le cylindre en papier et le cône en papier) sur ces trois feuilles de plastique, de manière à ce que leurs bases soient à la même hauteur, figure 9.10.

Placez des morceaux de papier au centre de ces trois supports en papier. Frottez la règle en acrylique et placez-la sous la première feuille en plastique. Déplacez-la lentement vers le haut, toujours dans une orientation horizontale. Les morceaux de papier ne bougent pas, même lorsque la règle en acrylique frottée se rapproche beaucoup de la feuille en plastique. Les morceaux de papier situés sur la partie supérieure du

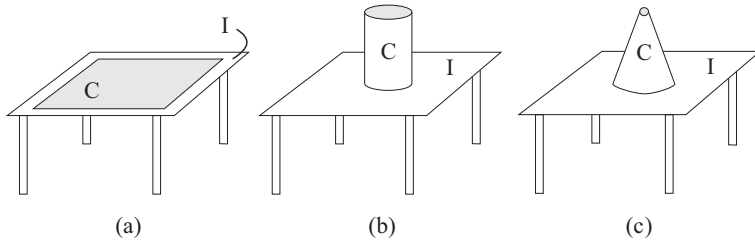


FIG. 9.10 : (a) Une feuille de papier conductrice C posée sur une feuille de plastique isolante I . (b) Un cylindre conducteur C posé sur une feuille isolante I . (c) Un cône conducteur C posé sur une feuille isolante I .

cylindre ne bougent pas non plus lorsque la règle frottée située sous le cylindre s'en approche. En revanche, lorsque la règle frottée située sous le cône s'approche de sa base, les morceaux de papier situés à son extrémité sont éjectés du cône, figure 9.11.

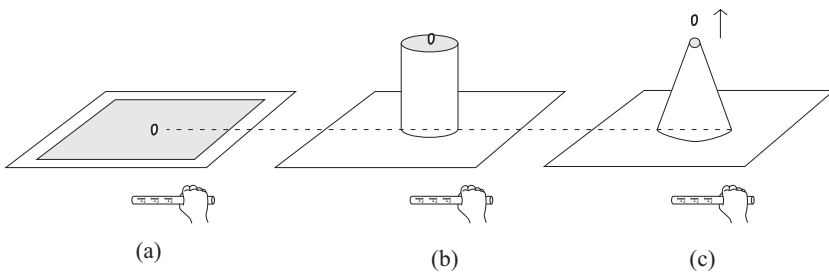


FIG. 9.11 : (a) Une règle électrisée sous une feuille de papier. (b) Sous un cylindre en papier. (c) Sous un cône en papier. Les morceaux de papier ne bougent pas dans les cas (a) et (b), mais sont projetés hors du cône dans le cas (c).

Les expériences 9.5 et 9.6 peuvent s'expliquer en supposant que les particules électrisées s'accroissent avec des densités de surface plus élevées à l'extrémité des conducteurs. Supposons que la règle en acrylique frottée soit électrisée négativement. Le papier se comporte comme un conducteur pour les expériences électrostatiques, tandis que le plastique se comporte comme un isolant. Considérons les morceaux de papier qui ont été projetés hors du cône dans l'expérience 9.6. Le cône est polarisé par la règle électrisée située en dessous, devenant positif sur ses parties inférieures et négatif sur ses parties supérieures, figure 9.12 (a).

La densité de charge superficielle est plus importante à la pointe du cône qu'à sa base. Un petit morceau de papier placé à la pointe du cône devient chargé négativement. Il est repoussé par la règle négative, attiré par les charges positives à la base du cône et repoussé par les autres charges négatives situées à la pointe du cône. La force électrique nette qui s'exerce sur lui est dirigée vers le haut. La composante principale de cette force est due à l'action répulsive exercée par les autres charges négatives situées à proximité, à la pointe du cône. Dans la situation illustrée à la figure 9.12 (a),

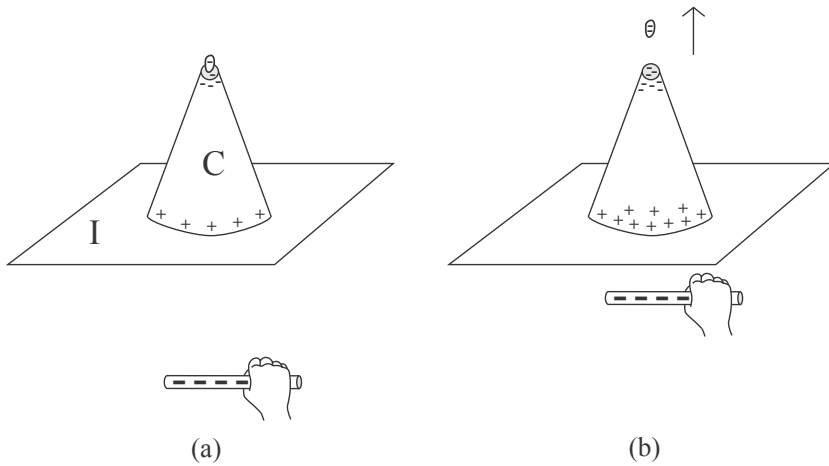


FIG. 9.12 : (a) Un cône conducteur C sur un support isolant I . Le cône est polarisé en raison de la présence d'un corps négatif en dessous. La densité de charge superficielle est plus importante à l'extrémité qu'à la base. (b) Lorsque la règle est rapprochée encore davantage du support isolant, le morceau de papier est éjecté du cône.

cette force répulsive nette est inférieure au poids du morceau de papier, de sorte qu'il n'est pas éjecté du cône. Lorsque la règle est rapprochée encore davantage de la base du cône, l'intensité de sa polarisation augmente. Il y a plus de charges positives à la base, plus de charges négatives à son sommet, et également plus de charges négatives sur chaque morceau de papier. Par conséquent, la force électrique nette vers le haut agissant sur le morceau de papier augmente également. Au-delà d'une distance critique de la règle, la force électrique répulsive nette agissant sur le morceau de papier sera supérieure à son poids. Il est alors éjecté du cône, figure 9.12 (b). Bien que le morceau de papier négatif soit repoussé par la règle négative, la composante principale de la force qui le projette hors du cône provient de la répulsion exercée par les autres particules négativement chargées situées à la pointe du cône. Ces charges négatives sont beaucoup plus proches du morceau de papier que la règle négative.

Considérons le cylindre de la figure 9.11 (b). Même lorsque la règle a été approchée de sa base, le morceau de papier n'a pas été projeté. La raison de ce comportement est que la densité de charge superficielle au sommet du cylindre n'avait pas la même ampleur que la densité de charge superficielle au sommet du cône de la figure 9.11 (c) lorsque la règle se trouvait à la même distance de sa base. Par conséquent, la force répulsive agissant sur le morceau de papier chargé négativement n'était pas suffisante pour surmonter son poids.

La situation était différente pour l'expérience 9.5. Le cône en papier est désormais relié à la terre en raison de son contact avec le sol. Lorsque la règle électrisée s'en approche, le cône a tendance à se polariser. Comme il est relié à la terre, une partie de sa charge polarisée est neutralisée. Il acquiert alors une charge nette de signe opposé à celle de la règle, figure 9.13 (a).

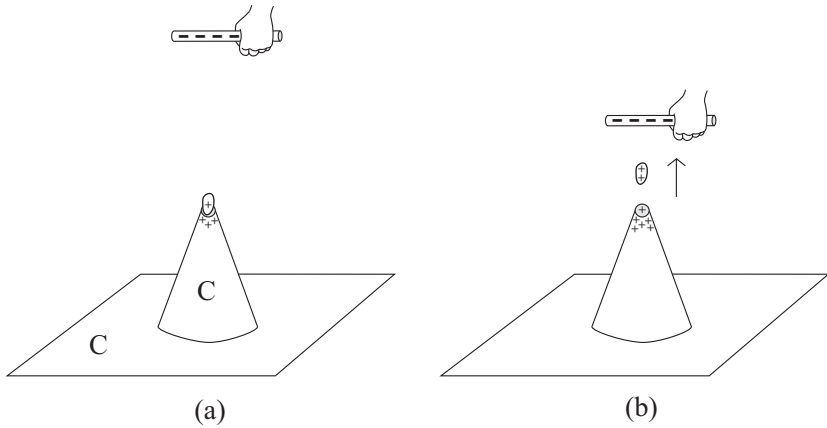


FIG. 9.13 : (a) Un cône conducteur C posé sur une surface conductrice C , qui met le cône à la terre. Le morceau de papier positif est attiré par la règle négative et repoussé par la pointe positive du cône mis à la terre. (b) Lorsque la règle se rapproche du cône, la quantité de charges positives sur le papier augmente, tout comme la quantité de charges positives sur la pointe du cône. Le morceau de papier se déplace vers la règle.

Cette électrisation se concentre au sommet du cône et, par conséquent, sur les morceaux de papier situés à l'extrémité du cône. Un morceau de papier électrisé positivement est alors soumis à l'action de deux forces, à savoir une force d'attraction exercée par la règle négative et une force de répulsion exercée par les autres parties positives du sommet du cône. Ces deux forces sont dirigées vers le haut, tandis que le poids du morceau de papier est dirigé vers le bas. À mesure que la règle négative se rapproche du cône, son extrémité devient de plus en plus positive. Il en va de même pour les morceaux de papier situés à son extrémité. En dessous d'une certaine distance critique, les deux forces ascendantes l'emportent sur le poids descendant du morceau de papier. Celui-ci se déplace alors vers la règle, figure 9.13 (b).

9.4 Intensification de l'effet de l'ambre

La plus ancienne expérience d'électrostatique est ce qu'on appelle l'effet de l'ambre, analogue à l'expérience 1.1. Il existe plusieurs procédures permettant d'augmenter son ampleur. Ces procédures sont déduites de ce qui a été vu dans le volume 1 de cet ouvrage et dans les expériences précédentes du volume 2. Nous énumérons ici certaines de ces procédures qui peuvent rendre cet effet plus visible, atteindre de plus grandes distances ou se produire avec une plus grande intensité, à savoir :

- Réaliser l'expérience par temps froid et sec.
- Le matériau qui sera frotté afin d'attirer des corps légers doit être un isolant. De cette manière, il ne se déchargera pas lorsqu'il sera en contact avec les mains. Lorsque ce matériau est un conducteur, il doit être isolé afin d'éviter la perte de

la charge acquise due à la mise à la terre avec les mains. Il peut, par exemple, être préalablement fixé sur une poignée isolée. Nous tiendrons alors le matériau uniquement par cette poignée, en évitant de le toucher directement avec les mains.

- Testez plusieurs matériaux isolants différents. Frottez dans des cheveux, par exemple, une paille en plastique, une règle en acrylique, un tube en PVC, une assiette en polystyrène, etc. Identifiez quel corps, après avoir été frotté, attirera une plus grande quantité de morceaux de papier.
- Testez différentes substances utilisées pour frotter chacun de ces corps. Frottez par exemple un tube en PVC avec des cheveux, une serviette en papier, un sac en plastique, un mouchoir en coton, etc. Identifiez la substance qui produira une plus grande électrisation du corps.
- Augmentez autant que possible l'amplitude de la densité de charge superficielle du matériau qui sera frotté. À cette fin, l'aspect le plus important est de le frotter vigoureusement avec des cheveux ou une feuille de papier. Plus il est frotté rapidement, plus la densité de charge acquise à sa surface sera importante.⁴
- Les corps légers à attirer doivent, de préférence, se comporter comme des conducteurs. Des exemples de corps conducteurs pour les expériences électrostatiques sont des morceaux de papier, de petites pièces de feuille d'aluminium, un fil de coton, etc. Considérons une règle en plastique électrisée attirant deux corps légers de même poids, forme et taille, à savoir un conducteur et un isolant. La force exercée par la règle sur le conducteur est beaucoup plus importante que celle exercée sur l'isolant, en supposant que les deux se trouvent à la même distance de la règle. Cette attraction plus forte peut être observée en remarquant que le conducteur est plus accéléré que l'isolant lorsque les deux sont relâchés au repos. De plus, le plastique électrisé doit être rapproché de l'isolant plutôt que du conducteur afin que chacun d'eux commence à se déplacer vers le plastique frotté.
- Les corps qui seront attirés par le plastique frotté doivent, de préférence, être placés sur une surface conductrice. En effet, un petit morceau de papier est attiré avec une force plus importante lorsqu'il se trouve au-dessus d'un conducteur que lorsqu'il se trouve au-dessus d'un isolant.
- Les corps légers doivent être initialement placés sur un support pointu. Un petit morceau de papier est attiré avec une force plus importante lorsqu'il se trouve au-dessus d'un support pointu que lorsqu'il se trouve au-dessus d'un support émoussé.

⁴[SGS31] et [Hei99, p. 451, note 6].

Chapitre 10

Équilibre électrique et l'instrument indiquant la différence de potentiel

10.1 Conducteur en équilibre électrique

Les corps naturels peuvent être divisés ou classés en deux groupes fondamentaux, les conducteurs et les isolants. La principale différence entre ces corps réside dans le fait que les conducteurs possèdent des particules électrisées mobiles qui peuvent se déplacer à travers le conducteur et le long de sa surface. Les isolants, en revanche, ne possèdent pas de particules électrisées libres pouvant se déplacer à travers tout le volume du matériau. Leurs particules mobiles ne peuvent se déplacer qu'à l'intérieur des molécules composant l'isolant. Par conséquent, les isolants ne permettent pas le passage ou le flux de particules électrisées à travers leur corps ni le long de leur surface. Nous rappelons une fois de plus au lecteur que le comportement conducteur ou isolant d'un corps dépend non seulement de sa nature ou de sa composition chimique, mais aussi de la différence de potentiel qui peut être appliquée à ses extrémités.

Supposons un conducteur C au repos par rapport au sol. Il peut être isolé électriquement du sol ou d'autres conducteurs. Il peut également être connecté au sol ou à d'autres conducteurs par des substances conductrices. Le conducteur peut avoir une charge nette positive, une charge nette négative ou une charge nette nulle. Il peut être seul ou soumis à l'action d'autres corps électrisés à proximité (il peut, par exemple, être polarisé en raison d'un corps chargé à proximité). Cette section présente la définition de l'équilibre électrique pour ce conducteur, valable dans toutes ces situations :

Définition 10.1

Considérons un conducteur électrisé au repos par rapport au sol, soumis à l'action électrique d'autres corps ou totalement isolé. Lorsque la répartition de sa charge reste constante dans le temps, on dit que l'électricité qui s'y trouve est « en équilibre » et que le conducteur est « en équilibre électrique ». En revanche, lorsque la répartition de sa charge change dans le temps, on dit que l'électricité qui s'exerce sur lui est « en déséquilibre » ou « déséquilibrée », tandis que le conducteur est dit être en « déséquilibre électrique » ou « électriquement déséquilibré ».

William Thomson (1824–1907), ou Lord Kelvin, a présenté une définition similaire en 1848 :^{1,2}

Équilibre électrique.

66. Lorsqu'un corps au repos est électrisé et que, soumis à l'action électrique d'autres corps ou totalement isolé, la répartition de sa charge reste inchangée, on dit que l'électricité qui le recouvre est en équilibre.

La densité de charge superficielle en chaque point d'un conducteur peut être indiquée indirectement par une fine bande de papier de soie reliée à ce point. Plus la déviation de la bande est importante, plus la densité de charge superficielle est élevée. Lorsque les angles d'inclinaison par rapport à la verticale de toutes les bandes reliées au corps restent constants dans le temps, on dit qu'il est en équilibre électrique. En revanche, lorsque l'inclinaison d'une bande varie en fonction du temps, on dit que le conducteur est en déséquilibre électrique ou qu'il est déséquilibré.

Exemples de déséquilibre électrique :

- Lorsqu'un conducteur est en cours de charge. Prenons, par exemple, un électroscope initialement déchargé. Il est en déséquilibre électrique lorsqu'une règle en plastique électrisée est raclée sur le bord du carton et que sa bande de papier de soie se soulève.
- Lorsqu'un conducteur est déchargé. Prenons, par exemple, un électroscope initialement chargé. Touchez son carton avec un doigt. L'électroscope se décharge en raison de la mise à la terre. Il est déséquilibré lorsque sa bande s'abaisse.
- Prenons un conducteur isolé de la terre. Le conducteur est polarisé par la présence d'un corps électrisé à proximité. Le degré ou l'intensité de cette polarisation varie dans le temps lorsque le corps électrisé s'approche ou s'éloigne du conducteur. Le conducteur est en déséquilibre pendant ces mouvements du corps électrisé à proximité.
- Lorsque deux électroscopes sont reliés par un conducteur défectueux ou imparfait, comme dans les expériences de la section 3.3. Supposons, par exemple,

¹[Tho84d, p. 46, §66].

²*Electrical Equilibrium*. 66. When a body held at rest is electrified, and when, being either subject to electrical action from other bodies, or entirely isolated, the distribution of its charge remains permanently unaltered, the electricity upon it is said to be in equilibrium.

deux électroscopes initialement déchargés reliés par un fil conducteur imparfait. Lorsqu'un plastique frotté est raclé sur le bord du carton d'un électroscope, sa bande se soulève presque immédiatement, tandis que la bande de l'autre conducteur se soulève lentement.

- Considérons un électroscope initialement électrisé et isolé d'un autre électroscope initialement déchargé. Relions leurs cartons par un fil conducteur imparfait. Les deux électroscopes seront déséquilibrés pendant que la bande du premier électroscope s'abaisse et celle du second s'élève.

10.2 Le potentiel électrique d'un conducteur

La température est la grandeur qui caractérise l'équilibre en physique thermique ou en thermologie. L'instrument qui mesure la température s'appelle un thermomètre. En ce qui concerne la statique des liquides, des gaz et des fluides, la grandeur qui caractérise l'équilibre mécanique s'appelle la pression. La pression atmosphérique est mesurée par un baromètre, tandis qu'un manomètre mesure les pressions en général.

En électrostatique, la grandeur qui caractérise l'équilibre est appelée « potentiel électrique » ou « potentiel électrostatique », et sera représentée par la lettre grecque ϕ . Nous pouvons alors présenter une autre définition :

Définition 10.2

Tous les points à l'intérieur et à la surface d'un conducteur homogène en équilibre électrique ont le même potentiel électrique, représenté par la lettre ϕ . De plus, ce potentiel électrique est constant dans le temps pour un conducteur en équilibre.

Nous présentons ici quelques brèves informations relatives au potentiel.³ Le concept de potentiel électrique a été introduit par Cavendish (1731–1810) en 1771, bien qu'il n'ait pas utilisé le terme « potentiel ». La fonction potentielle a été introduite comme concept mathématique dans la gravitation par Lagrange (1736–1813) en 1777. Laplace (1749–1827) a obtenu en 1782 l'équation satisfaite par cette fonction potentielle dans l'espace vide, publiant ses résultats en 1785. Poisson (1781–1840) a introduit la fonction potentielle en électromagnétisme en 1811. En 1813, il a généralisé l'équation de Laplace, obtenant une équation plus générale qui était également valable pour les régions contenant de la matière et des charges libres. Le nom « potentiel » a été introduit par Green (1793–1841) en 1828.

Cet ouvrage analyse l'instrument qui permet d'indiquer l'égalité ou la différence de potentiel entre deux conducteurs. Il aborde également les aspects pratiques liés au fonctionnement de cet instrument. Cet ouvrage ne traitera pas des propriétés mathématiques de la fonction potentielle.

³[Tho84b, p. 367], [Max54a, article 16, p. 15], [Whi73a, pp. 54–55 et 61], [Roc89], [Ass92a, p. 18], [Hei99, pp. 449 et 498–500] et [Ass15a, p. 22].

10.3 Électroscope avec boîtier conducteur

Cette section présente un instrument qui indique quand deux conducteurs ont le même potentiel électrostatique ou quand ils ont des potentiels différents.⁴ Lorsque cet appareil est correctement calibré, il permet également de mesurer cette différence de potentiel.

Supposons deux conducteurs C_1 et C_2 isolés l'un de l'autre et de la terre. Supposons en outre que chaque conducteur soit en équilibre électrique à des potentiels ϕ_1 et ϕ_2 , respectivement. Quel instrument est capable d'indiquer que $\phi_1 = \phi_2$ ou que $\phi_1 \neq \phi_2$? L'électroscope utilisé dans le volume 1 de cet ouvrage, représenté dans la section 2.2, figures 2.2 et 2.3, indique la densité de charge superficielle. Il n'indique pas le potentiel électrique. Plus la densité de charge superficielle est élevée à l'emplacement de la fine bande de papier de soie, plus elle sera élevée par rapport au carton. Une bande tombée ou verticale indique une densité de charge superficielle nulle ou très faible.

Le chapitre 7 a analysé la distribution des charges sur les parois internes et externes d'un conducteur creux. Il s'agissait d'une analyse indirecte à l'aide de fines bandes de papier de soie. Plus la déviation de la bande était importante, plus la densité de charge superficielle à son emplacement était élevée. Le chapitre 7 présentait également une analyse directe des densités de charge superficielle. Nous avons collecté une partie de l'électricité située sur les parois interne et externe d'un conducteur. À cette fin, des collecteurs de charge ou des plans de preuve ont été utilisés.

Dans le cas de l'expérience 7.1, figure 7.1, par exemple, les charges se répartissent uniquement sur la paroi externe d'une coque cylindrique électrisée. Il n'y a aucune charge sur la paroi interne. Ce conducteur électrisé en papier ou en carton est en équilibre. Ses parois interne et externe sont en contact électrique par l'intermédiaire du papier lui-même. Malgré l'existence de ce matériau conducteur reliant les parois interne et externe, il n'y a pas de densité de charge superficielle sur la paroi interne, tandis que la paroi externe a une densité de charge différente de zéro. Quel instrument pourrait indiquer que les parois interne et externe étaient au même potentiel?

Cet instrument important comporte deux parties conductrices, A et B , isolées électriquement l'une de l'autre, figure 10.1.

Normalement, les parties A et B sont uniquement constituées de matériaux conducteurs. L'instrument indiquera la différence de potentiel entre ses parties A et B . La partie A contient l'indicateur de différence de potentiel. La partie B est une coque, une cage ou un boîtier conducteur entourant la partie A .

L'indicateur de différence de potentiel situé sur la partie A est normalement l'angle d'ouverture entre deux feuilles ou bandes mobiles. Il peut également s'agir de l'angle d'ouverture entre une partie fixe de l'instrument et une feuille ou une bande mobile. La partie A dans cette dernière configuration peut être, par exemple, l'électroscope habituel des figures 2.2 et 2.3. La différence de potentiel entre les parties A et B sera indiquée par l'angle d'ouverture de la fine bande de papier de soie par rapport au carton fixe.

Nous appelons cet instrument un « électroscope à boîtier conducteur ». Un modèle

⁴[Tho84a], [Tho84c], [Per44] et [TP11].

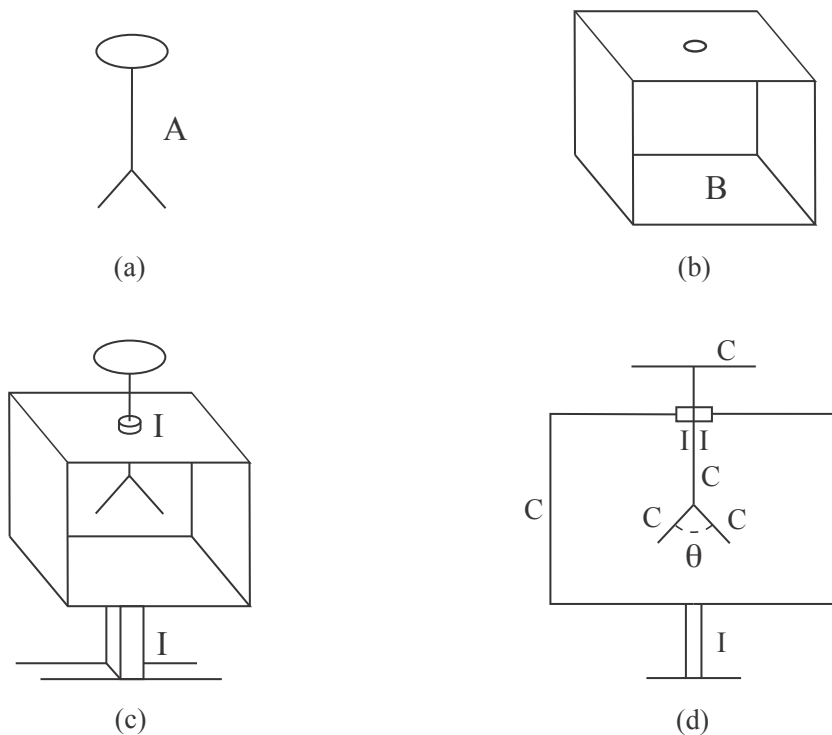


FIG. 10.1 : Électroscope avec boîtier conducteur. (a) Partie conductrice *A*. (b) Partie conductrice *B*. (c) Vue en perspective. Il y a un isolant *I* entre les parties *A* et *B* et un autre isolant *I* entre la partie *B* et la terre. (d) Instrument vu de profil. Les lettres *C* indiquent les conducteurs, les lettres *I* les isolants, tandis que la lettre θ indique l'angle d'ouverture entre les feuilles mobiles.

de l'instrument est illustré par la figure 10.1. La partie *A* de l'instrument est représentée dans la figure 10.1 (a). Elle comporte un disque horizontal, une tige ou un axe vertical, ainsi que deux lames mobiles qui peuvent s'ouvrir. La partie *B* de l'instrument est représentée dans la figure 10.1 (b). Il s'agit d'un boîtier conducteur avec un trou dans le couvercle supérieur. Les parties *A* et *B* sont uniquement constituées de matériaux conducteurs. La figure 10.1 (c) représente l'instrument construit. Il comporte un isolant *I* qui relie la partie *A* à la partie *B*, maintenant leur isolation électrique, et un autre isolant *I* qui isole électriquement la partie *B* du sol. La figure 10.1 (d) illustre l'instrument vu de profil. Les lettres *C* indiquent les conducteurs, les lettres *I* les isolants, tandis que la lettre θ indique l'angle d'ouverture indiqué par cet électroscope.

Les expériences des chapitres 7 et 8 présentent les principes qui justifient le mécanisme de fonctionnement de cet appareil. C'est un instrument approprié pour indiquer la différence de potentiel entre ses parties *A* et *B*.

La figure 10.2 illustre un électroscope à boîtier conducteur construit à partir des électroscopes simples des figures 2.2 et 2.3. La coque est une bande cylindrique

conductrice en papier ou en carton, soutenue par des pailles isolantes. L'isolant entre les parties *A* et *B* de cet électroscope est simplement de l'air. Les deux parties sont isolées du sol par des pailles en plastique.

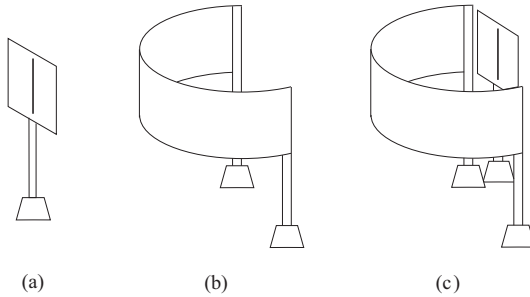


FIG. 10.2 : Électroscope avec boîtier conducteur. (a) La partie *A* est un électroscope simple constitué d'une bande de papier de soie collée sur un carton. Il est soutenu par une paille en plastique. (b) La partie *B* est une coque cylindrique ouverte en papier ou en carton. Elle est soutenue par des pailles en plastique. (c) Électroscope monté.

La figure 10.3 représente un autre électroscope avec un boîtier conducteur construit à partir de l'électroscope simple des figures 2.2 et 2.3. La coque est désormais une boîte à chaussures en carton conducteur. Deux côtés et demi de la boîte ont été supprimés. Il y a une partie isolante *A* entre la partie *B*. La partie *A* est isolée du sol par la paille en plastique, tandis que la partie *B* est isolée par une plaque de polystyrène.

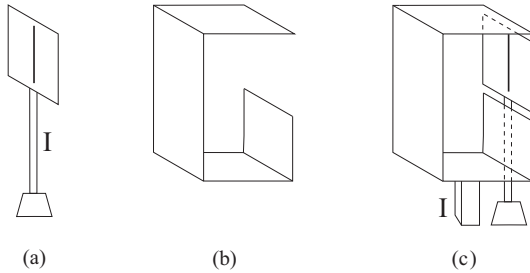


FIG. 10.3 : Autre exemple d'électroscope avec boîtier conducteur. (a) La partie *A* est un électroscope simple composé d'une bande de papier de soie collée sur un carton. Il est soutenu par une paille en plastique *I*. (b) La partie *B* est une boîte à chaussures à laquelle il manque deux côtés et demi. (c) Électroscope monté soutenu par une plaque isolante *I*.

La figure 10.4 illustre un autre électroscope avec un boîtier conducteur. La lettre *C* désigne les conducteurs, *I* les isolants et θ l'angle d'ouverture.

La figure 10.5 (a) et (b) représente un électroscope classique avec un boîtier conducteur. Il comporte deux feuilles ou bandes mobiles. La figure 10.5 (c) et (d) illustre un électroscope avec un boîtier conducteur qui comporte une seule bande mobile. Les

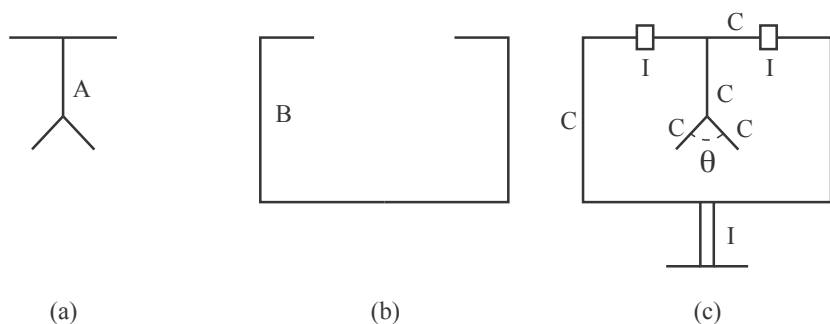


FIG. 10.4 : Électroscope avec boîtier conducteur vu de profil. (a) Partie conductrice A . (b) Partie conductrice B . (c) Instrument monté. Les conducteurs sont représentés par les lettres C , les isolants par les lettres I , tandis que l'angle d'ouverture est indiqué par θ .

conducteurs sont représentés par les lettres C , les isolants par les lettres I , tandis que l'angle d'ouverture est indiqué par la lettre θ .

L'isolant entre les parties A et B peut être de l'air, un morceau de polystyrène, du plastique ou du PVC. Certains manuels mentionnent un bouchon de liège reliant les parties A et B . Ce n'est pas un bon choix, car le liège se comporte comme un conducteur en électrostatique, comme indiqué dans la section 3.1. Toute substance reliant les parties A et B de cet électroscope doit être testée au préalable. Seuls des isolants doivent être utilisés. De nombreux types de caoutchouc, par exemple, se comportent comme des conducteurs et ne doivent pas être utilisés comme isolants dans cet appareil.

Dans de nombreux électroscopes commerciaux ou éducatifs, les parties conductrices sont en métal. Dans cet ouvrage, l'instrument sera fabriqué à partir de papier, de carton et de bandes de papier de soie.

Dans un instrument de précision, la partie B doit envelopper ou recouvrir presque entièrement la partie A . Cependant, afin de voir l'angle d'ouverture, il doit y avoir un trou ou une ouverture dans la partie B . Idéalement, la taille de ce trou doit être petite, afin qu'il n'affecte pas la différence de potentiel indiquée par l'instrument. Dans ce livre, nous utiliserons cet appareil uniquement comme indicateur qualitatif des différences de potentiel, sans nous soucier des mesures quantitatives. Les électroscopes peuvent donc avoir de grandes ouvertures sur la partie B .

Normalement, deux électrodes conductrices sont connectées aux parties A et B de tout électroscope avec boîtier conducteur. L'électrode dite principale, PE , relie la partie A à un certain conducteur C_1 , tandis que l'électrode dite secondaire, SE , relie la partie B à un autre conducteur C_2 , figure 10.6.

Dans cet exemple, l'angle d'ouverture θ de la partie A indiquera la différence de potentiel entre les conducteurs C_1 et C_2 . Lorsque $\theta = 0$, les conducteurs C_1 et C_2 auront le même potentiel. Lorsque $\theta \neq 0$, les conducteurs C_1 et C_2 auront des potentiels différents. Plus la valeur de θ est grande, plus leur différence de potentiel sera importante. Idéalement, les parties A et B de l'électroscope devraient avoir une petite

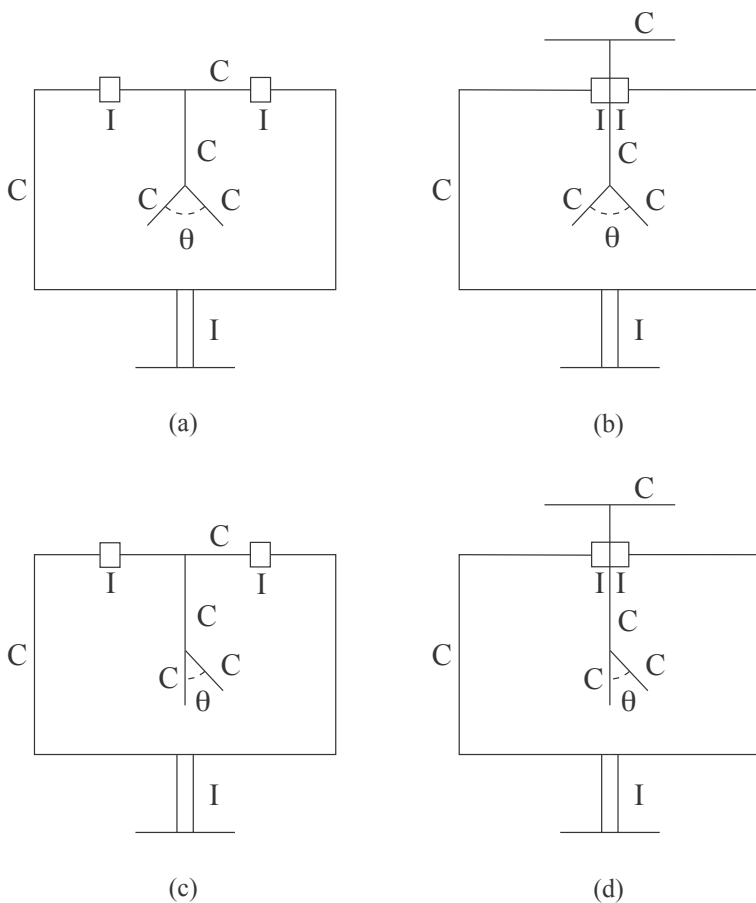


FIG. 10.5 : Électroscope avec boîtiers conducteurs. (a) et (b) : Électroscope avec deux feuilles mobiles. (c) et (d) : Électroscope avec une seule bande mobile pouvant s'ouvrir par rapport à une partie fixe.

surface par rapport à celle des conducteurs C_1 et C_2 . Dans ce cas, elles n'auront pas d'influence significative sur les potentiels à mesurer.

Ces deux électrodes peuvent également être connectées à différentes parties d'un même conducteur afin de vérifier que tous les points de ce conducteur soient au même potentiel.

Dans de nombreuses situations, le conducteur C_2 sera la Terre elle-même, de sorte que le boîtier conducteur de l'électroscope sera mis à la terre. Dans ce cas, l'angle d'ouverture indiquera la différence de potentiel entre le conducteur C_1 et la Terre. Le potentiel de la Terre est généralement défini comme étant nul. La partie B peut être mise à la terre par l'électrode secondaire, comme dans la figure 10.7 (a). Lorsque la partie B est supportée par une plaque conductrice connectée à la Terre, elle sera automatiquement mise à la terre. L'électrode secondaire ne sera plus nécessaire, comme

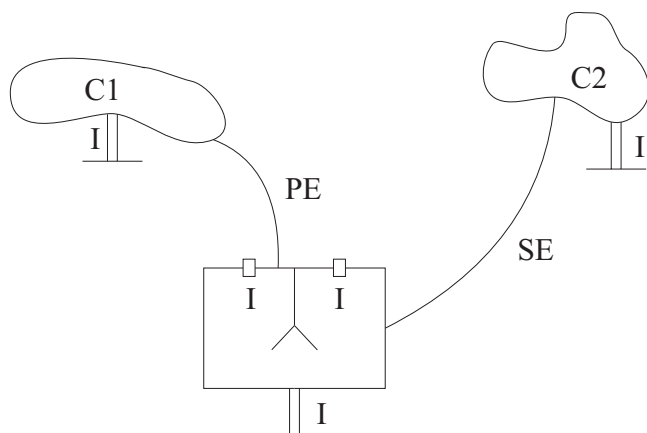


FIG. 10.6 : L'électrode principale PE relie la partie A de l'électroscope au conducteur C_1 , tandis que l'électrode secondaire SE relie la partie B au conducteur C_2 .

indiqué dans la figure 10.7 (b).

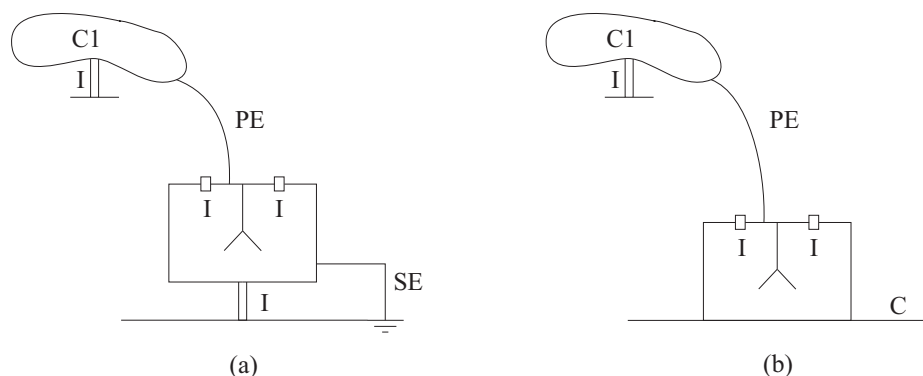


FIG. 10.7 : Électroscope avec boîtier mis à la terre. (a) Électrode secondaire connectée à la terre. (b) Boîtier sur une plaque conductrice C connectée à la terre.

Normalement, les électrodes reliant l'électroscope aux conducteurs C_1 et C_2 sont des fils métalliques. Nous devons les manipuler afin d'effectuer ces connexions. À cette fin, les électrodes doivent être isolées du sol afin d'éviter la décharge des conducteurs. L'isolation des fils de cuivre toronnés courants vendus dans les magasins d'électricité est généralement en polyéthylène ou en PVC. Ils constituent de bons isolants pour des différences de potentiel allant jusqu'à environ 300 V. Dans les expériences électrostatiques, en revanche, nous avons affaire à des tensions pouvant atteindre 1 000 V ou 10 000 V. Ces plastiques souples qui entourent les fils de cuivre ne sont pas de bons isolants pour les expériences électrostatiques. Par conséquent, lorsque vous utilisez ces fils isolés comme électrodes, ne les touchez pas directement avec les mains.

Manipulez ces électrodes avec précaution. Idéalement, fixez une partie de ces fils à l'aide d'une règle en acrylique ou d'un tube en PVC. Enroulez, par exemple, une partie du fil sur la règle en plastique, comme dans la figure 10.8 (a). La main ne touchera alors que la règle ou le tube en PVC, mais pas le fil. Connectez de cette manière la partie A de l'électroscope au conducteur C_1 sans décharger ce conducteur.

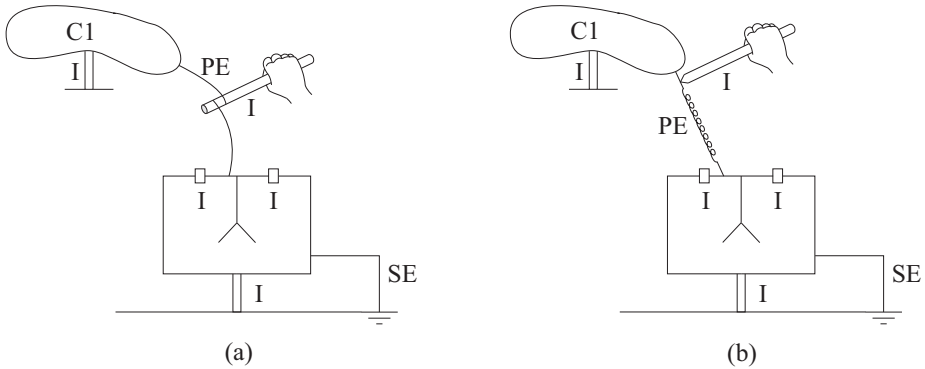


FIG. 10.8 : Électroscope avec un boîtier mis à la terre et dont l'électrode principale est reliée à un tube isolant. (a) Fil conducteur enroulé autour du tube. (b) Ressort conducteur relié au tube.

Vous pouvez également manipuler ces électrodes à l'aide d'une autre procédure. Pour ce faire, utilisez des fils conducteurs enroulés, comme des ressorts, qui peuvent être comprimés ou étirés. Fixez l'extrémité de ce fil à une règle en acrylique ou à un tube en PVC,⁵ comme indiqué dans la figure 10.8 (b).

Afin de transformer cet électroscope en électromètre, il serait nécessaire de le calibrer, de sorte que chaque angle d'ouverture corresponde à une différence de potentiel connue. Dans cet ouvrage, nous ne traiterons pas de ce problème. L'électroscope sera utilisé uniquement pour savoir si deux points ont le même potentiel ou des potentiels différents. Il indiquera également de manière qualitative l'amplitude de la différence de potentiel par la taille de l'angle d'ouverture. Un grand angle indique une grande différence de potentiel, tandis qu'un petit angle indique une faible différence de potentiel.

10.4 Expériences utilisant l'électroscope avec boîtier conducteur

10.4.1 L'électroscope montre que toutes les parties d'un conducteur en équilibre ont le même potentiel

Cette sous-section décrit certaines expériences liées à l'égalité de potentiel entre différentes parties d'un seul conducteur électrisé en équilibre. Les expériences que

⁵[Per44, Fig. 1277, p. 1421].

nous avons réalisées utilisaient l'électroscope simple entouré d'une coque cylindrique conductrice ouverte comme celle de la figure 10.2, ou l'électroscope simple entouré d'une boîte à chaussures conductrice comme celle de la figure 10.3. La différence de potentiel est indiquée qualitativement par l'angle d'ouverture entre la bande de papier de soie et le carton de l'électroscope. Cependant, les images des expériences de cette section ont été réalisées avec l'électroscope de la figure 10.6. Ce dernier électroscope possède deux feuilles mobiles, tandis que celui que nous avons utilisé n'en avait qu'une seule. Quoiqu'il en soit, il est plus facile et plus didactique de représenter les résultats des expériences avec l'électroscope de la figure 10.6 qu'avec celui de la figure 10.3.

Nous réalisons d'abord quelques expériences montrant que cet instrument indique que deux parties arbitraires d'un seul conducteur électrisé en équilibre sont réellement au même potentiel. Plus tard, nous montrons certaines conditions expérimentales qui font que le potentiel de la partie A de l'électroscope est différent du potentiel de sa partie B .

Expérience 10.1 — *Toucher les parois internes et externes d'une coque cylindrique électrisée*

Commencez avec une coque cylindrique électrisée comme celle de la figure 7.1 (b). Les charges nettes se répartissent uniquement sur la surface externe du cylindre, comme l'indiquent les bandes de papier de soie soulevées. Ce fait est également mis en évidence lorsqu'un plan de preuve touche ses surfaces interne et externe. Vous pouvez ensuite tester la charge acquise par ce collecteur. Supposons dans la présente expérience qu'il n'y ait pas de bandes de papier de soie sur la paroi interne de la coque cylindrique et une seule bande sur sa paroi externe. Lorsque la coque est électrisée, cette bande se soulève. Connectez l'électrode principale de l'électroscope de la figure 10.6 à la paroi interne du cylindre électrisé, tandis que l'électrode secondaire est connectée à la paroi externe. Les bandes de papier de soie de la partie A de l'électroscope restent en bas, avec $\theta = 0$. Par conséquent, les parois interne et externe d'une coque cylindrique électrisée sont au même potentiel, figure 10.9.

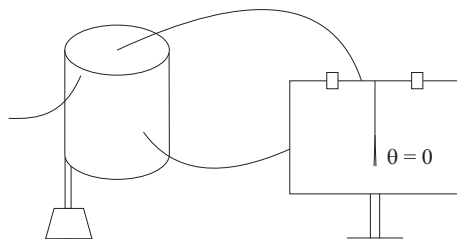


FIG. 10.9 : La partie A de l'électroscope est reliée à la paroi interne d'une coque cylindrique électrisée et la partie B est reliée à la paroi externe. L'électroscope ne présente aucun angle d'ouverture, ce qui indique que ces deux parois ont le même potentiel.

Ce fait peut également être démontré à l'aide de l'électroscope mis à la terre de la figure 10.7. À cette fin, connectez le conducteur principal à la paroi interne du cylindre électrisé et observez l'angle d'ouverture θ_1 des bandes de la partie A , figure 10.10 (a).

Connectez ensuite l'électrode principale à la paroi externe du cylindre électrisé et observez l'angle d'ouverture θ_2 des bandes de la partie *A*, figure 10.10 (b). Après avoir réalisé cette expérience, on constate que $\theta_1 = \theta_2 \equiv \theta$.⁶ Par conséquent, les parois interne et externe du cylindre électrisé ont le même potentiel par rapport au sol. Il n'y a pas de différence de potentiel entre les parois interne et externe, c'est-à-dire que $\theta_1 - \theta_2 = 0$. Elles sont alors en équilibre électrique.

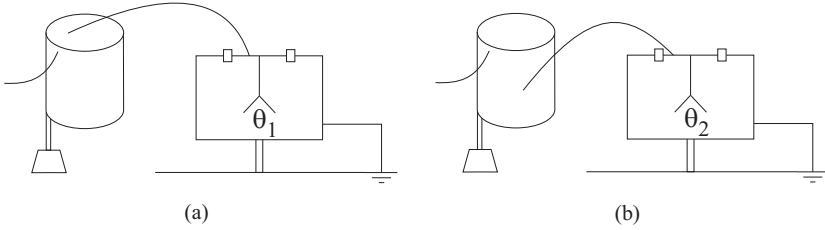


FIG. 10.10 : (a) Électroscope mis à la terre dont la partie *A* est reliée à la paroi interne d'une coque cylindrique électrisée. Angle d'ouverture θ_1 . (b) Même configuration, mais avec la partie *A* reliée à la paroi externe. Angle d'ouverture θ_2 . L'ouverture est identique dans les deux cas, c'est-à-dire que $\theta_1 = \theta_2$.

Vous pouvez également démontrer ce fait d'une autre manière. Pour cela, inversez l'électrode qui est reliée à la terre. Reliez la partie *A* à la terre via l'électrode principale. L'électrode secondaire est d'abord connectée à la paroi interne de la coque cylindrique électrisée. Observez l'angle d'ouverture θ_1 , figure 10.11 (a). L'électrode secondaire est ensuite connectée à la paroi externe de la coque. Observez l'angle d'ouverture θ_2 , figure 10.11 (b). En comparant ces deux angles, nous concluons que dans les deux situations, l'angle d'ouverture est le même, à savoir $\theta_1 = \theta_2 = \theta$. Par conséquent, les parois interne et externe sont en équilibre au même potentiel, car nous constatons que $\theta_1 - \theta_2 = 0$.

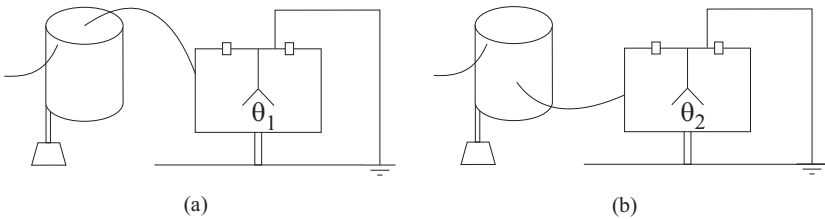


FIG. 10.11 : (a) Électroscope mis à la terre par la partie *A*, tandis que la partie *B* est reliée à la paroi interne d'une coque cylindrique électrisée. Angle d'ouverture θ_1 . (b) Même configuration avec la partie *B* reliée à la paroi externe. Angle d'ouverture θ_2 . Dans les deux cas, l'angle d'ouverture est identique, c'est-à-dire $\theta_1 = \theta_2$.

La configuration de la figure 10.11 est très intéressante. Elle montre un angle d'ouverture $\theta \neq 0$ pour les bandes mobiles de la partie *A* même lorsque cette partie *A* est

⁶Le symbole « \equiv » indique une définition.

mise à la terre, à condition que la partie B ait un potentiel différent de celui de la partie A . Bien que la partie A mise à la terre soit à un potentiel nul, la partie B de l'électroscope est connectée à une coque cylindrique électrisée qui est à un potentiel différent de zéro.

Expérience 10.2 — *Toucher différents points d'un conducteur asymétrique*

Une autre expérience de ce type utilise une bande conductrice asymétrique, comme le conducteur en forme de goutte de la figure 9.6 (b). Lorsque ce conducteur est électrisé, il se forme un gradient de densité de charge superficielle le long de sa surface, plus important dans les régions pointues et plus faible dans les régions émoussées, comme le montre un plan de preuve, voir figure 9.8. Collez l'extrémité supérieure d'une bande de papier de soie sur la paroi externe de ce conducteur afin d'indiquer quand il est électrisé. Une fois chargée, cette bande se soulève. Connectez l'électrode principale d'un électroscope mis à la terre à n'importe quel point de la paroi externe du conducteur, en observant toujours le même angle d'ouverture θ . Les densités de charge superficielle σ sont différentes aux points 1, 2 ou 3, à savoir $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$. Malgré cela, l'angle d'ouverture est le même en tous ces points, à savoir $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 \equiv \theta$, figure 10.12.

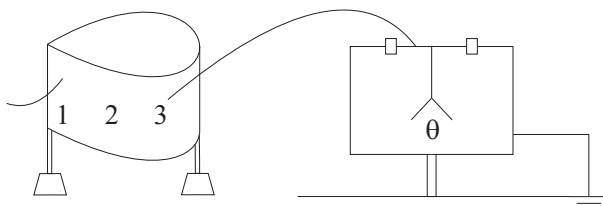


FIG. 10.12 : Électroscope mis à la terre indiquant le même angle d'ouverture θ , que l'électrode principale soit connectée au point 1, 2 ou 3 du conducteur de descente électrisé.

Expérience 10.3 — *Toucher différents points d'une longue bande électrisée*

Effectuez un test similaire en utilisant le rectangle électrisé des expériences 9.2 et 9.4, figure 9.4. Commencez par électriser fortement le rectangle, de manière à ce que les bandes de papier de soie se soulèvent visiblement. La densité de charge superficielle est plus élevée aux bords du rectangle qu'au centre, figure 9.5. Connectez l'électrode principale d'un électroscope mis à la terre à n'importe quel point du rectangle. Observez que l'angle d'ouverture θ de l'électroscope sera toujours le même, quel que soit l'endroit où l'électrode est connectée. Cela indique que tous ces points ont le même potentiel électrique. Il existe un gradient de densité de charge superficielle, plus important aux bords du rectangle et plus faible dans ses régions centrales. Mais le potentiel électrique est le même en tous points, figure 10.13.

Cette procédure peut également être inversée. Reliez la partie A de l'électroscope à la terre et connectez l'électrode secondaire aux points 1, 2 ou 3 du rectangle

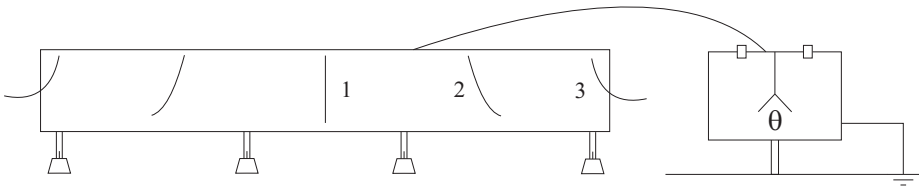
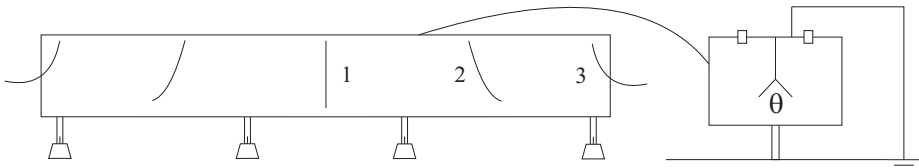
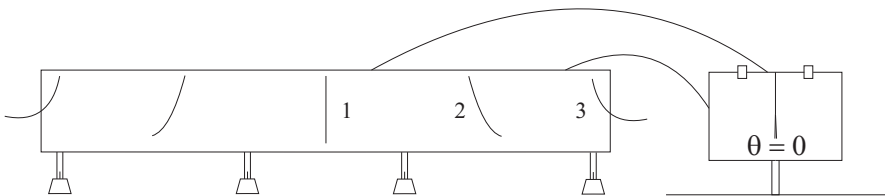


FIG. 10.13 : Électroscope mis à la terre indiquant toujours le même angle d'ouverture θ , que son électrode touche les points 1, 2 ou 3 du rectangle électrisé.

électrisé. L'angle d'ouverture θ sera toujours le même, quel que soit l'emplacement où l'électrode secondaire est connectée, figure 10.14 (a).



(a)



(b)

FIG. 10.14 : (a) Électroscope mis à la terre par la partie A indiquant toujours le même angle d'ouverture θ , quel que soit l'emplacement où l'électrode secondaire est connectée. (b) Électroscope isolé dont la partie A est connectée à un point du rectangle électrisé, tandis que la partie B est connectée à un autre point du rectangle. Il n'y a pas d'angle d'ouverture de l'électroscope.

Isolez cet électroscope du sol. Connectez sa partie A à un point spécifique du rectangle électrisé, tandis que sa partie B est connectée à n'importe quel autre point du rectangle. Observez que les feuilles de l'électroscope restent fermées, $\theta = 0$, figure 10.14 (b). Cela indique que tous les points du rectangle électrisé ont le même potentiel. Malgré cela, il existe différentes densités de charge superficielle en différents points du rectangle, comme l'indiquent ses bandes surélevées ou la collecte de charges provenant de différentes régions du rectangle à l'aide d'un plan de preuve.

10.4.2 Procédés permettant de modifier le potentiel d'un conducteur par rapport au potentiel d'un autre conducteur

Cette sous-section décrit certaines expériences liées à l'égalité ou à la différence de potentiel entre deux conducteurs électrisés isolés. Jusqu'à présent, nous avons vu comment un électroscope à boîtier conducteur indique que deux parties d'un même conducteur en équilibre ont le même potentiel. Cette sous-section décrit comment modifier le potentiel d'un conducteur par rapport au potentiel d'un autre conducteur. Elle présente également certaines procédures permettant de modifier le potentiel de la partie A de cet électroscope par rapport au potentiel de sa partie B .

Expérience 10.4 — Approcher un corps électrisé d'une des parties de l'électroscope

Commencez avec un électroscope dont le boîtier conducteur est mis à la terre par sa partie B . Au départ, la partie A doit également être à potentiel zéro, de manière à ce qu'il n'y ait aucun angle d'ouverture entre ses bandes, figure 10.15 (a). Électrifiez négativement une règle en plastique en la frottant avec des cheveux, un morceau de papier ou un mouchoir en coton. La règle en acrylique frottée est ensuite approchée de la partie A de l'électroscope mis à la terre. Il y a maintenant un angle d'ouverture θ_1 entre ses bandes, indiquant que la partie A est à un potentiel différent de zéro, figure 10.15 (b). Plus la règle est proche, plus cet angle d'ouverture sera grand.

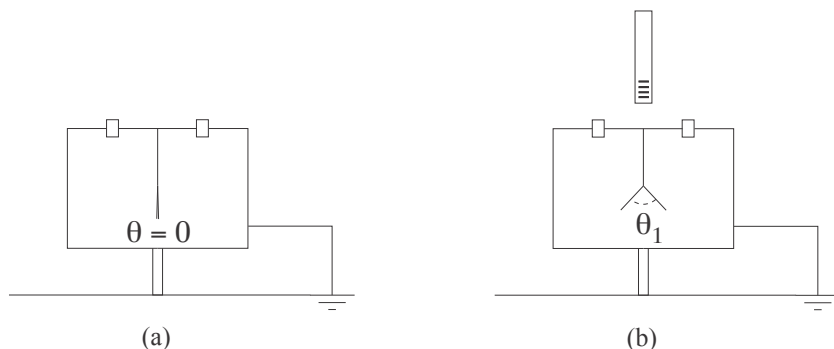


FIG. 10.15 : Électroscope mis à la terre par la partie B . (a) Les parties A et B sont initialement à potentiel zéro. (b) Lorsqu'une règle en acrylique frottée est approchée de la partie A , les bandes se soulèvent.

En retirant la règle, l'angle d'ouverture redevient nul.

Reliez à la terre la partie A de l'électroscope. Lorsque les parties A et B sont à potentiel nul, les bandes de l'électroscope restent abaissées, sans angle d'ouverture, figure 10.16 (a). Approchez la même règle en acrylique frottée de la partie B de l'électroscope. Il y a maintenant un angle d'ouverture θ_2 de sa bande, indiquant que la partie B est à nouveau à un potentiel différent de zéro, tandis que la partie A est restée au potentiel de terre, figure 10.16 (b). Plus la règle frottée est proche de la partie B , plus l'angle d'ouverture sera grand.

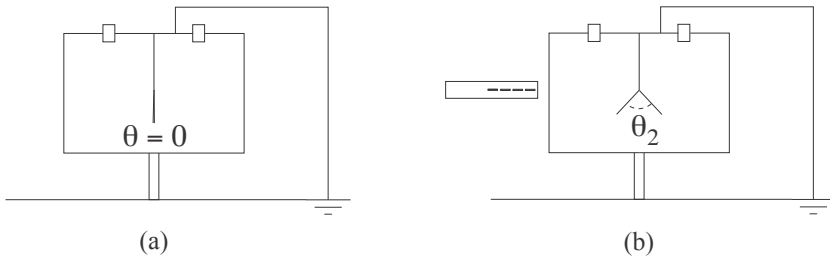


FIG. 10.16 : (a) Électroscope mis à la terre par la partie A . Au départ, les parties A et B sont à potentiel nul. (b) Lorsqu'une règle en acrylique frottée est approchée de la partie B , les bandes se soulèvent.

Expérience 10.5 — *Rapprocher un corps électrisé de l'une des parties de l'électroscope, en supposant que les parties A et B sont reliées par un fil conducteur*

Supposons maintenant un électroscope avec un boîtier conducteur isolé du sol. Reliez ses parties A et B par un fil conducteur. Lorsque la règle acrylique frottée est approchée de la partie A , les bandes de l'électroscope restent fermées, figure 10.17 (a). Il n'y a pas non plus d'angle d'ouverture lorsque la règle frottée est approchée de la partie B , figure 10.17 (b).

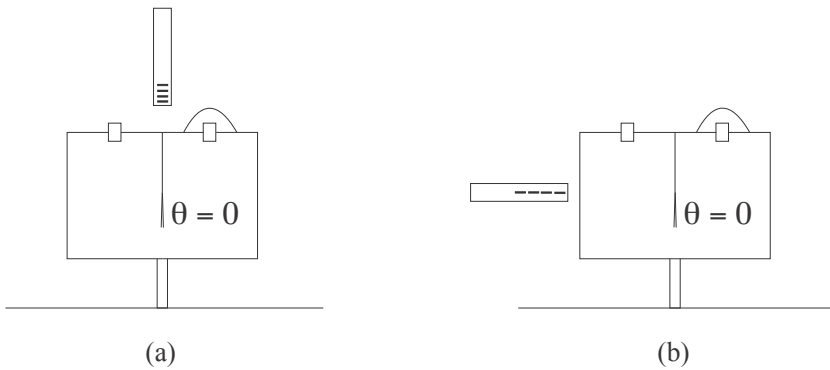


FIG. 10.17 : Électroscope isolé du sol, dont les parties A et B sont reliées par un fil conducteur. (a) Ses bandes restent fermées lorsqu'une règle en acrylique frottée est approchée de sa partie A . (b) Il n'y a pas non plus d'angle d'ouverture lorsque la règle frottée est approchée de la partie B .

Ce comportement peut être justifié. Lorsque la règle acrylique frottée est approchée de l'électroscope, les potentiels des parties connectées A et B augmentent de manière égale par rapport au potentiel zéro de la terre. Autrement dit, lorsque la règle frottée est proche de l'électroscope, $\phi_A \neq 0$ et $\phi_B \neq 0$, bien que $\phi_A - \phi_B = 0$, quelle que soit la position ou la distance de la règle par rapport à l'électroscope.

Expérience 10.6 — Électrisation d'une des parties de l'électroscope

L'expérience 10.4 a montré comment créer une différence de potentiel entre les parties A et B d'un électroscope isolé lorsqu'un corps électrisé est approché de l'une de ses parties. Une différence de potentiel peut également être créée en électrisant séparément la partie A ou la partie B . Commencez avec un électroscope isolé du sol. Ses parties A et B doivent être initialement déchargées. Il n'y aura pas d'angle d'ouverture dans l'électroscope. Électrisez la partie A . Cela peut être fait, par exemple, en raclant une règle en acrylique sur le bord du carton de l'électroscope de la partie A , comme dans la figure 10.2 (a). Vous pouvez également électriser la partie A en touchant son carton avec un collecteur de charge rectangulaire électrisé comme un électrophore. Lorsque la partie A est électrisée, sa bande se soulève, comme dans l'électroscope à bande mobile unique de la figure 10.18 (a), ou ses feuilles s'ouvrent, comme dans l'électroscope à deux feuilles mobiles de la figure 10.18 (b).

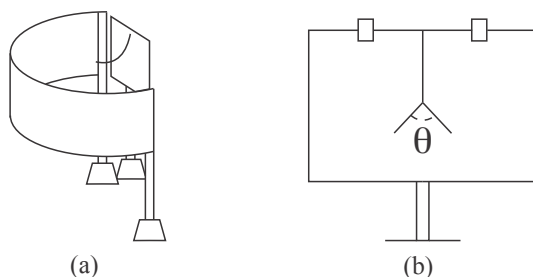


FIG. 10.18 : Électroscope isolé du sol. Électrisez uniquement la partie A . (a) Lorsque l'électroscope comporte une seule bande mobile, celle-ci se soulève. (b) Lorsque l'électroscope comporte deux bandes mobiles, celles-ci s'écartent.

Déchargez le carton de l'électroscope, de sorte que les deux parties A et B aient une charge nulle et soient à un potentiel nul. Électrisez uniquement la partie B . Pour ce faire, vous pouvez racler une règle en acrylique sur le carton cylindrique de la figure 10.2 (b), ou toucher ce carton cylindrique avec un électrophore électrisé. L'électrisation de la partie B peut être indiquée par une bande externe relevée, figure 10.19 (a). Lorsqu'il y a un électroscope avec une seule bande mobile interne sur la partie A , celle-ci se soulève, comme dans la figure 10.19 (b). Lorsque l'électroscope comporte deux bandes mobiles, celles-ci s'ouvrent, comme dans la figure 10.19 (b).

Bien que la partie A n'ait pas été électrisée dans cette dernière expérience, sa bande interne s'est soulevée (ou ses deux feuilles se sont ouvertes). Cet angle d'ouverture est dû au fait que lorsque seule la partie B a été électrisée, une différence de potentiel s'est créée entre les parties A et B de cet électroscope.

Expérience 10.7 — Électrisation d'une des parties de l'électroscope, en supposant que les parties A et B sont reliées par un fil conducteur

Supposons maintenant que les parties A et B soient reliées par un fil conducteur et que l'électroscope soit isolé de la terre. Lorsque cet électroscope est électrisé, sa

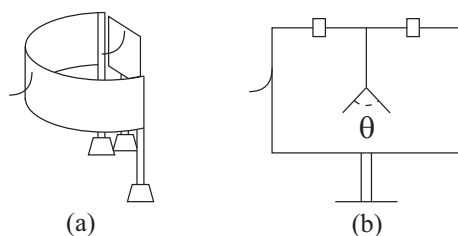


FIG. 10.19 : Électrisez uniquement la partie B . (a) La bande externe de la partie B se soulève, indiquant que cette partie a été électrisée. La bande interne de la partie A se soulève également, indiquant une différence de potentiel entre les parties A et B . (c) Les bandes mobiles de la partie A s'ouvrent dans un autre modèle d'électroscope.

bande interne reste abaissée, comme dans la figure 10.20 (a), ou ses deux bandes restent fermées, comme dans la figure 10.20 (b). Les bandes relevées sur les parois externes des électroscopes des figures 10.20 (a) et (b) ont été dessinées uniquement pour indiquer que cet électroscope isolé a été électrisé dans son ensemble.

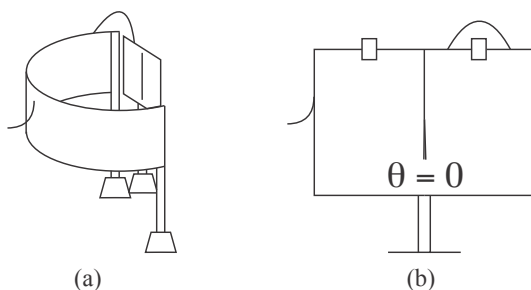


FIG. 10.20 : Électroscope isolé dont les parties A et B sont reliées par un fil conducteur. (a) Chargez l'électroscope et sa bande interne reste abaissée. (b) Électrisez un autre modèle d'électroscope et ses deux feuilles internes restent fermées.

10.5 Kelvin et l'électromètre pour mesurer la différence de potentiel

En 1860, Kelvin a clairement précisé qu'un électroscope ou un électromètre avec un boîtier conducteur est un instrument approprié pour indiquer l'égalité ou la différence de potentiel entre deux conducteurs :^{7,8}

⁷[Tho84a, Note sur la p. 192].

⁸Two conducting bodies are said to be of the same electric potential when, if put in conducting communication with the two electrodes of an electrometer, no electric effect is produced. When, on the other hand, the electrometer shows an effect, the amount of this effect measures the difference of potentials between the two bodies thus tested.

On dit que deux corps conducteurs ont le même potentiel électrique lorsque, mis en communication conductrice avec les deux électrodes d'un électromètre, aucun effet électrique n'est produit. En revanche, lorsque l'électromètre indique un effet, l'amplitude de cet effet mesure la différence de potentiel entre les deux corps ainsi testés.

L'« effet » mentionné ici par Kelvin est normalement l'angle d'ouverture entre les deux bandes de la partie *A* de l'électromètre à boîtier conducteur. L'électrode principale relie la partie *A* au premier corps conducteur, tandis que l'électrode secondaire relie la partie *B* de l'électromètre au deuxième corps conducteur.

Nous citons ici un autre ouvrage de Kelvin datant de 1860, nos commentaires figurant entre crochets :^{9,10}

336. *Interprétation des mesures effectuées à l'aide d'un électromètre.*—Tout type d'électromètre se compose d'une cage ou d'un boîtier contenant un conducteur mobile et un conducteur fixe, dont au moins l'un est isolé [électriquement de la terre] et mis en communication métallique, par ce que j'appellerai l'électrode principale passant par une ouverture dans le boîtier ou la cage, avec le conducteur dont l'électricité doit être testée. Dans tout électromètre correctement construit, la force électrique subie par la partie mobile dans une position donnée ne peut être influencée électriquement que par la modification de la différence de

⁹[Tho84c, pp. 258–259].

¹⁰336. *Interpretation of measurement by electrometer.*—Every kind of electrometer consists of a cage or case containing a moveable and a fixed conductor, of which one at least is insulated [electrically from the ground] and put in metallic communication, by what I shall call the principal electrode passing through an aperture in the case or cage, with the conductor whose electricity is to be tested. In every properly constructed electrometer, the electric force experienced by the moveable part in a given position cannot be electrically influenced except by changing the difference of potentials between the principal electrode and the uninsulated conductor or conducting system in the electrometer. Even the best ordinary electrometers hitherto constructed do not fulfil this condition, as the inner surface of the glass of which the whole or part of the enclosing case is generally made, is liable to become electrified, and inevitably does become so when any high electrification is designedly or accidentally introduced, even for a very short time; the consequence of which is that the moving body will generally not return to its zero position when the principal electrode is perfectly disinsulated. Faraday long ago showed how to obviate this radical defect by coating the interior of the glass case with a fine network of tinfoil; and it seems strange that even at the present day electrometers for scientific research, as, for instance, for the investigation of atmospheric electricity, should be constructed with so bad and obvious a defect uncured by so simple and perfect a remedy. When it is desired to leave the interior of the electrometer as much light as possible, and to allow it to be clearly seen from any external position with as little embarrassment as possible, a cage made like a bird's cage, with an extremely fine wire on a metal frame, inside the glass shade used to protect the instrument from currents of air, etc., may be substituted with advantage for the tinfoil network lining of the glass. It appears, therefore, that a properly constructed electrometer is an instrument for measuring, by means of the motions of a moveable conductor, the difference of potentials of two conducting systems insulated from one another, of one of which the case or cage of the apparatus forms part. It may be remarked in passing, that it is sometimes convenient in special researches to insulate [from the ground] the case or cage of the apparatus, and allow it to acquire a potential differing from that of the earth, and that then, as always, the subject of measurement is the difference of potentials between the principal electrode and the case or cage, while in the ordinary use of the [grounded] instrument the potential of the latter is the same as that of the earth. Hence we may regard the electrometer merely as an instrument for measuring differences of potential between two conducting systems mutually insulated; and the object to be aimed at in perfecting any kind of electrometer (more or less sensitive as it may be, according to the subjects of investigation for which it is to be used), is, *that accurate evaluations in absolute measure, of differences of potential, may be immediately derivable from its indications.*

potentiel entre l'électrode principale et le conducteur non isolé ou le système conducteur de l'électromètre. Même les meilleurs électromètres ordinaires construits jusqu'à présent ne remplissent pas cette condition, car la surface intérieure du verre dont est généralement fait tout ou partie du boîtier est susceptible de s'électriser, et le devient inévitablement lorsqu'une forte électrisation est introduite de manière intentionnelle ou accidentelle, même pendant un temps très court ; il en résulte que le corps mobile ne revient généralement pas à sa position zéro lorsque l'électrode principale est parfaitement désisolée. Faraday a montré il y a longtemps comment remédier à ce défaut radical en recouvrant l'intérieur du boîtier en verre d'un fin réseau de feuille d'étain ; il semble étrange qu'aujourd'hui encore, les électromètres destinés à la recherche scientifique, par exemple pour l'étude de l'électricité atmosphérique, soient construits avec un défaut aussi grave et évident, qui pourrait être corrigé par un remède aussi simple et parfait. Lorsque l'on souhaite laisser l'intérieur de l'électromètre aussi clair que possible et permettre de le voir clairement depuis n'importe quelle position extérieure avec le moins d'encombrement possible, une cage semblable à une cage à oiseaux, avec un fil extrêmement fin sur un cadre métallique, à l'intérieur de l'abat-jour en verre utilisé pour protéger l'instrument des courants d'air, etc., peut avantageusement remplacer le réseau de feuille d'étain qui recouvre le verre. Il apparaît donc qu'un électromètre correctement construit est un instrument permettant de mesurer, au moyen des mouvements d'un conducteur mobile, la différence de potentiel entre deux systèmes conducteurs isolés l'un de l'autre, dont l'un fait partie du boîtier ou de la cage de l'appareil. On peut remarquer au passage qu'il est parfois pratique, dans certaines recherches spéciales, d'isoler [de la terre] le boîtier ou la cage de l'appareil et de lui permettre d'acquérir un potentiel différent de celui de la terre, et que, comme toujours, l'objet de la mesure est la différence de potentiel entre l'électrode principale et le boîtier ou la cage, alors que dans l'utilisation normale de l'instrument [mis à la terre], le potentiel de ce dernier est le même que celui de la terre. Nous pouvons donc considérer l'électromètre simplement comme un instrument permettant de mesurer les différences de potentiel entre deux systèmes conducteurs mutuellement isolés ; et l'objectif à atteindre pour perfectionner tout type d'électromètre (plus ou moins sensible selon les sujets d'étude pour lesquels il doit être utilisé) est que *des évaluations précises en mesure absolue des différences de potentiel puissent être immédiatement dérivées de ses indications.*

Kelvin faisait ici référence aux travaux de Faraday de 1838, dans lesquels il utilisait le balancier de torsion de Coulomb comme électromètre. Il apporta une amélioration à cet appareil, à savoir qu'il recouvrit l'intérieur du boîtier en verre d'un matériau conducteur mis à la terre. Ce boîtier en verre était à l'origine placé autour des corps qui s'attiraient ou se repoussaient afin d'éviter les perturbations causées par les courants d'air. En le recouvrant d'un matériau conducteur, Faraday a pu éviter l'influence des corps électrisés externes sur les corps internes :^{11,12}

¹¹[Far38, article 1180, p. 368].

¹²That the inductive action within the electrometer might be uniform in all positions of the repelled ball and in all states of the apparatus, two bands of tin foil, about an inch wide each, were attached to the inner surface of the glass cylinder, going entirely round it, at the distance of 0.4 of an inch from each other, and at such a height that the intermediate clear surface was in the same horizontal plane with the lever and ball. These bands were connected with each other and with the earth, and, being perfect conductors, always exerted a uniform influence on the electrified balls within, which the glass surface, from its irregularity of condition at different times, I found, did not.

Afin que l'action inductive à l'intérieur de l'électromètre soit uniforme dans toutes les positions de la boule repoussée et dans tous les états de l'appareil, deux bandes de feuille d'étain, d'environ un pouce de large chacune, ont été fixées à la surface intérieure du cylindre de verre, en faisant tout le tour, à une distance de 0,4 pouce [1 cm] l'une de l'autre, et à une hauteur telle que la surface claire intermédiaire se trouvait dans le même plan horizontal que le levier et la boule. Ces bandes étaient reliées entre elles et à la terre et, étant de parfaits conducteurs, elles exerçaient toujours une influence uniforme sur les boules électrisées à l'intérieur, ce qui n'était pas le cas de la surface en verre, en raison de son état irrégulier à différents moments, comme je l'ai constaté.

Chapitre 11

Décharges électriques dans l'air

Dans le chapitre 9, nous avons décrit ce que l'on appelle l'effet de pointe, à savoir certains effets associés aux pointes des conducteurs électrisés. Ces pointes ont d'autres effets extrêmement importants liés aux décharges électriques et aux étincelles dans l'air. Certains de ces phénomènes seront abordés dans ce chapitre :

1. L'air est plus facilement ionisé à proximité des régions pointues des conducteurs électrisés qu'à proximité de leurs parties émoussées. Lorsqu'il est ionisé, l'air se comporte comme un conducteur.
2. Il est alors plus facile d'électriser un conducteur à travers l'air ionisé à proximité de ses pointes. Approchez un corps électrisé d'une région pointue d'un conducteur isolé. Le corps et le conducteur n'ont pas besoin d'être en contact. L'échange de leurs particules électrisées se fait par l'air conducteur entre eux.
3. Il est également possible de décharger un conducteur initialement électrisé par ses régions pointues lorsque ces pointes sont proches d'un conducteur mis à la terre. Autrement dit, le conducteur électrisé n'a pas besoin de toucher le conducteur mis à la terre pour être déchargé.

11.1 Étincelles

Réalisez des expériences extrêmement simples et intéressantes en fixant une aiguille, une épingle ou un fil métallique sur un électroscope simple.¹ L'aiguille ou le fil peuvent être fixés à l'arrière de l'électroscope à l'aide de ruban adhésif. Une petite partie de celle-ci, de 1 à 2 cm, doit dépasser du carton, figure 11.1.

¹[FM91, p. 62], [Fersdb, Pára-raios : Igrejinha, p. 40], [Gas03, pp. 239–243] et [LSB08].

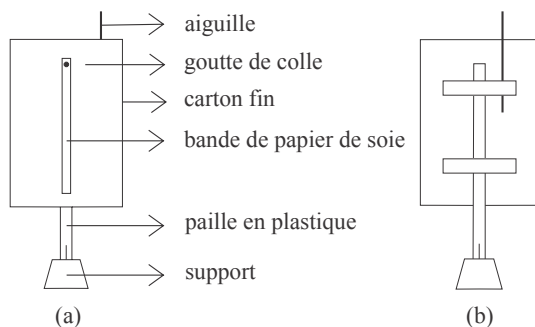


FIG. 11.1 : (a) Électroscope vu de face avec une aiguille fixée à l'arrière. (b) Vue arrière.

Expérience 11.1 — Électriser un électroscope à distance

Chargez négativement une paille en plastique ou une règle en acrylique en la frottant dans des cheveux ou avec une serviette en papier ou un mouchoir en coton. Tenez-la horizontalement à quelques centimètres au-dessus de la pointe de l'aiguille. Rien ne se passe. Lorsqu'elle se rapproche encore plus de l'électroscope, à environ 1 cm de la pointe, la fine bande de papier de l'électroscope se soulève. En retirant la paille, la bande retombe.

Répétez cette procédure avec l'électroscope initialement déchargé, figure 11.2 (a).

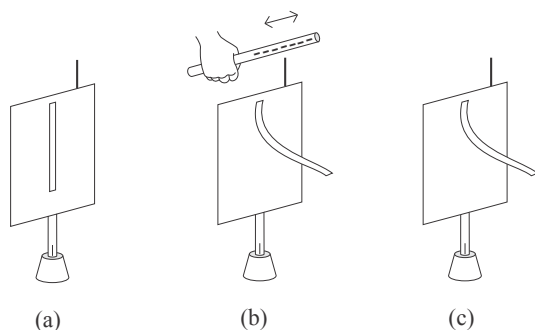


FIG. 11.2 : (a) Un électroscope déchargé avec une aiguille à l'arrière. (b) Une paille frottée, très proche de la pointe de l'aiguille, effectuant un mouvement horizontal de va-et-vient. La bande se soulève de l'électroscope. (c) En retirant la paille, la bande reste éloignée du carton !

Cette fois-ci, la paille électrisée doit être rapprochée encore davantage de l'aiguille, à une distance de 1 à 3 mm de sa pointe, *sans la toucher*. La bande de papier de soie se soulèvera. La paille frottée doit être déplacée horizontalement en va-et-vient au-dessus de la pointe de l'aiguille, en restant toujours très proche de celle-ci, figure 11.2 (b). De plus, la paille doit être tournée ou pivotée autour de son axe longitudinal pendant le mouvement oscillatoire, présentant différentes zones de sa surface

à l'aiguille. Éloignez la paille de l'électroscope. La bande reste éloignée du carton de l'électroscope, figure 11.2 (c).

La bande reste éloignée du carton après que la paille frottée a été retirée. Ce fait prouve que l'électroscope s'est électrisé grâce à cette procédure. *Ce phénomène présente quelque chose de nouveau, à savoir l'électrisation de l'électroscope sans contact avec un autre corps électrisé!*

Nous n'avons pas abordé ce mécanisme de charge dans le volume 1 de cet ouvrage. Jusqu'à présent, nous n'avions considéré que trois autres moyens de charge, à savoir : (I) Par friction, comme dans l'effet de l'ambre, section 1.1. (II) Par contact d'un conducteur avec un autre corps électrisé, comme dans le mécanisme *ACR*, section 4.4. (III) L'électrisation par induction ou par polarisation.²

Expérience 11.2 — Découverte du signe de la charge acquise par l'électroscope

Considérons l'électroscope chargé selon la procédure de l'expérience 11.1. Approchez lentement la même paille frottée de la bande relevée de cet électroscope chargé. La paille frottée doit être horizontale, à la même hauteur que l'extrémité inférieure de la bande relevée. Le mouvement d'approche doit être très lent, afin d'éviter tout contact entre les deux. Observez attentivement la direction dans laquelle la bande tente de se déplacer, c'est-à-dire si elle se déplace vers la paille frottée ou s'en éloigne. En réalisant cette expérience avec soin, concluez que la bande se déplace vers le carton, c'est-à-dire qu'elle s'éloigne de la paille frottée qui s'approche.

La bande peut se déplacer d'un sens à l'autre avec la paille frottée. Pour cela, déplacez la paille vers la bande et éloignez-la de celle-ci. La bande se déplacera en accord avec la paille, vers le carton et loin de celui-ci. Si vous souhaitez observer ce mouvement oscillatoire de la bande, l'amplitude ou la magnitude du mouvement de la paille frottée doit être faible. Autrement dit, utilisez des mouvements de faible amplitude. Évitez également d'approcher la paille frottée trop près de la bande, figure 11.3.

Ce comportement de la bande montre que l'électroscope à aiguille s'est électrisé avec une charge de même signe que celle de la paille frottée, car il y a répulsion entre eux. Vous pouvez alors représenter les charges de l'électroscope électrisé comme ayant le même signe que les charges du plastique frotté. Dans l'exemple présent, ces charges seraient négatives.

Expérience 11.3 — Décharge d'un électroscope à distance

Inversez l'expérience 11.1 en utilisant à nouveau un électroscope muni d'une aiguille à l'arrière. Commencez avec un électroscope chargé, comme l'indique la bande de papier de soie soulevée, figure 11.4 (a).

Tenez à la main de manière horizontale une brochette en bois ou un fil métallique. Approchez-le lentement de l'électroscope chargé, à une distance de 1 à 3 mm de la pointe de l'aiguille, sans la toucher. En quelques secondes, la bande tombe, devenant verticale et touchant le carton, figure 11.4 (b) et (c). En retirant la brochette ou le fil, la bande reste en bas, figure 11.4 (d).

²Comme discuté dans la section 7.5 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

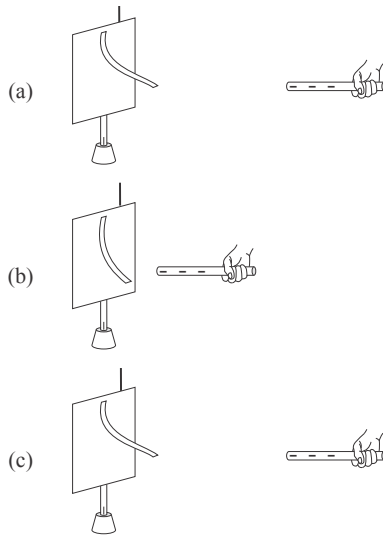


FIG. 11.3 : Répulsion entre la paille chargée négativement et l'électroscope chargé par ce plastique frotté. (b) Lorsque la paille est approchée de l'électroscope, la bande descend. (a) et (c) : Lorsque le plastique est éloigné de l'électroscope, la bande remonte.

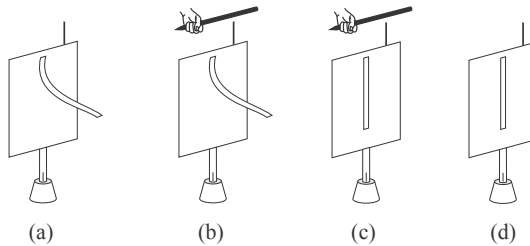


FIG. 11.4 : (a) Un électroscope chargé. (b) et (c) : lorsqu'une brochette en bois ou un fil métallique est approché très près de la pointe de l'aiguille, sans la toucher, la bande descend. (d) En retirant la brochette, la bande reste en bas.

Dans cette expérience, l'électroscope a été déchargé à distance, sans contact. Il a suffi d'approcher un conducteur mis à la terre (brochette en bois ou fil métallique tenu à la main) très près de la pointe de l'aiguille.

Expérience 11.4 — *Influence du nombre d'aiguilles dans l'intervalle de temps nécessaire pour décharger un électroscope*

Comparez le temps nécessaire pour décharger un électroscope électrisé en fonction de la présence ou de l'absence d'une aiguille à l'arrière. Nous considérons deux électroscopes de même taille et de même forme. Le premier est classique, sans aiguille. Le second est muni d'une aiguille à l'arrière, dont la pointe dépasse du carton.

Les deux électroscopes doivent être séparés l'un de l'autre. Raclez une paille ou une règle en acrylique sur leurs cartons. Ils doivent être électrisés de manière égale. Le même degré d'électrisation sera indiqué lorsque les deux bandes se soulèveront d'un angle égal θ par rapport à leur carton. Retirez la paille frottée et mesurez les temps de décharge des deux électroscopes. C'est-à-dire l'intervalle de temps nécessaire pour que les bandes retombent jusqu'à toucher leur carton. Il est facile d'observer que l'électroscope avec une aiguille se décharge plus rapidement que l'autre électroscope.

Réalisez cette expérience avec un troisième électroscope contenant deux ou trois aiguilles. L'une des aiguilles peut sortir verticalement vers le haut et les deux autres latéralement, l'une vers la droite et l'autre vers la gauche, par exemple. Électrifiez les trois électroscopes de manière égale et mesurez leurs temps de décharge. Plus le nombre d'aiguilles est élevé, plus la décharge sera rapide.

Expérience 11.5 — *Transfert de charges entre deux conducteurs séparés l'un de l'autre*

Utilisez deux canettes de soda vides, *A* et *B*. Collez l'extrémité supérieure d'une fine bande de papier de soie sur chacune d'elles. Une épingle ou une aiguille doit être fixée horizontalement dans l'une de ces canettes en passant l'épingle à travers un trou dans son corps. Elle doit être fixée sur la canette avec du ruban adhésif. La pointe de cette épingle horizontale doit sortir de la canette. Chaque canette doit être posée sur une plaque isolante en polystyrène. L'épingle qui dépasse de la canette *A* doit être très proche du centre de la canette *B*, sa pointe se trouvant à 1 ou 2 mm de *B*. Au départ, les deux canettes doivent être déchargées, comme l'indiquent leurs bandes tombées, figure 11.5 (a).

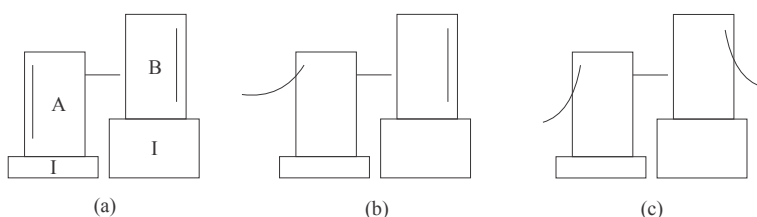


FIG. 11.5 : (a) Deux boîtes conductrices déchargées isolées du sol par des plaques de polystyrène *I*. Une épingle horizontale dépasse d'une boîte, son extrémité étant très proche de l'autre boîte. (b) Électrifiez uniquement la boîte *A* en raclant un morceau de plastique sur son corps. (c) Après un certain temps, les deux boîtes deviennent électrisées, comme l'indiquent leurs bandes relevées.

Électrifiez uniquement la boîte *A* en raclant plusieurs fois son bord supérieur avec une règle en acrylique frottée, figure 11.5 (b). Retirez la règle en acrylique frottée. Après un certain temps, les deux boîtes deviennent électrisées, figure 11.5 (c).

Cette expérience montre que nous pouvons électriser la boîte *B* à distance de la boîte électrisée *A*.

Expérience 11.6 — Un autre exemple de ce transfert de charges à distance

Inversez la procédure de l'expérience 11.5. Électrisez la boîte *B* en raclant une règle en acrylique sur son bord supérieur, figure 11.6 (b). Retirez la règle frottée. Après un certain temps, les deux boîtes deviennent électrisées, figure 11.6 (c).

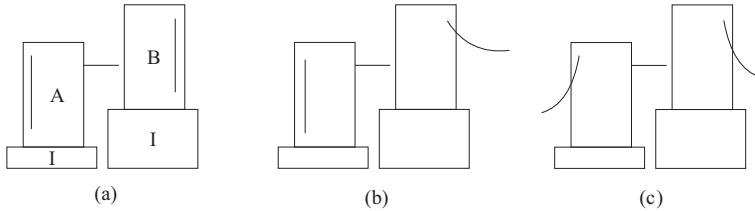


FIG. 11.6 : (a) Deux canettes déchargées et isolées, dont l'une contient une épingle. (b) Canette électrisée *B*. (c) Après un certain temps, les deux canettes deviennent électrisées.

Dans cette expérience, nous avons électrisé la canette *A*, qui comporte une épingle, sans qu'elle soit en contact avec la canette électrisée *B*.

11.2 Commentaires sur ces expériences

Les expériences de la section 11.1 sont extrêmement intéressantes.

L'expérience 11.1 a utilisé un électroscope déchargé avec une aiguille métallique qui en dépassait. Une paille frottée a été approchée très près de la pointe de l'aiguille. Après un certain temps, l'électroscope s'est électrisé. Il n'y avait aucun contact entre la paille électrisée et la pointe de l'aiguille. L'électrisation s'est donc produite à travers l'air intermédiaire. L'air sec se comporte normalement comme un isolant pour les expériences électrostatiques. Cette conclusion peut être tirée du fait qu'un simple électroscope ne contenant aucune aiguille peut rester électrisé pendant quelques minutes, bien qu'il soit entouré d'air. Dans l'expérience 11.1, en revanche, l'air autour de l'aiguille pointue s'est comporté comme un conducteur. Beaucoup de ses molécules étaient ionisées ou électrisées. Comme ces ions étaient mobiles, l'échange de particules électrisées entre la paille électrisée, les ions de l'air et l'électroscope a été possible.

L'expérience 11.3 a utilisé un électroscope initialement chargé avec une aiguille métallique qui en dépassait. Un conducteur mis à la terre a été approché très près de la pointe de l'aiguille. Après un certain temps, l'électroscope s'est déchargé. Le conducteur mis à la terre était une brochette en bois ou un fil métallique. L'électroscope s'est déchargé sans le mécanisme de mise à la terre habituel qui se produit par contact. Dans cette expérience, en revanche, la brochette en bois a été approchée de la pointe de l'aiguille, sans la toucher. L'air autour de la pointe s'est comporté comme un conducteur lorsque la brochette en bois a été approchée de la pointe. Cette brochette en bois ou ce fil métallique était mis à la terre par contact avec la main qui le tenait. Lorsqu'il a été approché très près de la pointe de l'aiguille, l'air conducteur qui l'entourait a permis la décharge de l'électroscope.

L'expérience 11.4 a montré que la présence de pointes sur un conducteur électrisé, isolé du sol, facilite sa décharge à travers l'air qui l'entoure. Une fois de plus, c'est l'air autour des pointes des conducteurs électrisés qui se comporte comme un conducteur, facilitant la décharge de l'électroscope.

Ce changement de comportement de l'air, qui passe d'isolant à conducteur, est un phénomène complexe qui dépend de plusieurs facteurs. Nous n'expliquerons pas dans cet ouvrage comment l'air peut changer de comportement, passant d'isolant à conducteur. Nous nous contenterons de décrire certaines de ses principales propriétés. Cette transition n'est ni lente ni progressive : elle se produit en un clin d'œil. Elle est appelée « décharge corona ». Étant donné deux points dans l'air, lorsque la différence de potentiel entre eux est inférieure à une certaine valeur critique, l'air se comporte comme un bon isolant. Au-delà de cette valeur critique, en revanche, il se comporte comme un bon conducteur. Le champ électrique maximal (différence de tension par unité de distance) qu'un isolant peut supporter dans des conditions idéales sans se dégrader, c'est-à-dire sans perdre ses propriétés isolantes, est appelé « rigidité diélectrique » du matériau. Cette valeur critique dépend de nombreux facteurs. Pour l'air, en particulier, elle dépend de la pression atmosphérique. La rigidité diélectrique de l'air à pression normale ($P = 1 \text{ atm} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$) est d'environ $3 \times 10^6 \text{ V/m} = 3\,000 \text{ V/mm}$.³

Prenons, par exemple, l'expérience 11.1. Supposons que l'électroscope puisse être chargé lorsqu'il y a une distance de 2 mm entre la paille électrisée et la pointe de l'aiguille. Dans ce cas, il y aura une différence de potentiel d'environ 6 000 V entre la paille et l'électroscope.

À partir d'expériences comme celle-ci, ou de la mesure de la distance entre deux sphères conductrices dans l'expérience du compte-gouttes de Kelvin nécessaire pour produire une étincelle, nous concluons que dans les expériences électrostatiques habituelles, nous traitons des différences de potentiel allant généralement de 1 000 V à 10 000 V.⁴ Bien que ces différences de potentiel soient beaucoup plus importantes que celles disponibles dans les batteries ordinaires (quelques volts), la quantité de charges électriques impliquées dans les expériences électrostatiques est généralement très faible.

Il convient de souligner ici que les étincelles dans l'air ne sont pas dues à l'extraction d'électrons des électrodes. Afin d'éliminer les électrons des surfaces métalliques à basse température, nous avons besoin de forces par unité de charge de l'ordre de 10^8 V/m . Ce phénomène est connu sous le nom d'« émission d'électrons par champ », « émission de champ », « émission d'électrons par champ » ou « émission froide ». Cette valeur de 10^8 V/m est supérieure de deux ordres de grandeur au champ électrique critique de $3 \times 10^6 \text{ V/m}$ nécessaire pour ioniser l'air à la pression atmosphérique.⁵

³[TM09, pp. 91 et 125].

⁴[Tho68], [Llo80], [Cam06], [CA08] et sections 6.6, 7.11 et 7.12 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

⁵[Sav89, p. 249], [Sil10c], [Sil11] et [Sil16].

11.3 Paratonnerres

Les expériences 11.1 et 11.3 montrent qu'il est possible de charger ou de décharger un électroscope à distance. L'expérience 11.4 montre que l'air autour d'une région pointue électrisée d'un conducteur se comporte comme un conducteur. Ce comportement conducteur de l'air à proximité de conducteurs pointus électrisés est le principe de fonctionnement des paratonnerres. Ce mécanisme de fonctionnement peut être illustré par quelques expériences simples.

Expérience 11.7 – Simulation d'un paratonnerre

Découpez un morceau de carton fin en forme de maison simple. Il peut être fixé au sol à l'aide d'une fente ou d'une rainure dans une planche ou une plaque de bois. Collez l'extrémité supérieure d'une fine bande de papier de soie sur la maison afin d'indiquer les effets électriques possibles. Un fil métallique de 20 ou 30 cm de long est fixé verticalement à côté de la maison. Il doit être isolé de la maison par des morceaux de polystyrène ou de plastique rigide. L'extrémité inférieure du fil doit pénétrer dans la planche de bois. Ce dispositif représentera un paratonnerre, figure 11.7 (a), dans lequel la lettre *I* représente les matériaux isolants.

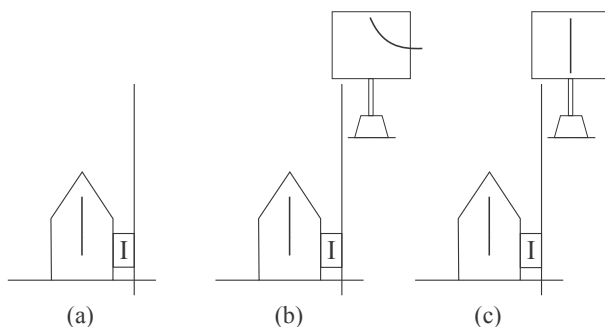


FIG. 11.7 : (a) Le paratonnerre est un fil conducteur isolé de la maison ou du bâtiment qu'il protège. Son extrémité inférieure est enfoncée dans le sol. (b) Approchez le bord inférieur d'un électroscope chargé très près de l'extrémité supérieure du fil. (c) L'électroscope est déchargé par le paratonnerre. La maison et sa fine bande de papier de soie ne sont pas affectées par la décharge.

Notre modèle de nuage électrisé sera un simple électroscope soutenu par une paille isolante. Électrisez ce nuage en raclant une règle en acrylique sur le bord supérieur du carton. Le degré d'inclinaison de sa bande de papier de soie indique le niveau d'électrisation de ce nuage. Tenez-le par sa paille isolante. Approchez le bord inférieur du carton de l'extrémité supérieure du fil métallique, en évitant tout contact, jusqu'à une distance de 1 à 3 mm, figure 11.7 (b). L'électroscope se décharge alors sans entrer en contact avec le fil métallique, figure 11.7 (c). De plus, la maison n'est pas affectée par cette décharge. Autrement dit, sa bande de papier de soie n'est pas affectée pendant tout ce processus et reste toujours verticale.

Cette expérience illustre le mécanisme de fonctionnement d'un paratonnerre et son rôle protecteur. Le paratonnerre est un fil conducteur dont l'extrémité inférieure pénètre dans le sol. Son extrémité supérieure dépasse verticalement la maison ou le bâtiment qu'il protège. Il est isolé de ce bâtiment par un matériau isolant I . Supposons qu'un nuage électrisé passe au-dessus du paratonnerre. L'extrémité supérieure du paratonnerre s'électrise avec une charge de signe opposé à celle du nuage. Lorsqu'il y a une haute tension entre le nuage et le sol, l'air autour de l'extrémité du paratonnerre se comporte comme un conducteur. Ce canal conducteur peut décharger le nuage à travers le paratonnerre.

11.4 Paratonnerre isolé du sol

Le paratonnerre destiné à protéger les bâtiments contre les décharges électriques provenant des nuages doit être mis à la terre.

En revanche, lorsque le fil métallique est isolé du sol, on parle alors de « tige d'essai » ou de « paratonnerre isolé du sol ». Il est utilisé pour collecter une partie de l'électricité accumulée dans les nuages ou dans l'atmosphère. Nous pouvons alors tester ou vérifier le signe de cette charge collectée, son intensité à différentes altitudes ou emplacements de la tige, son intensité en fonction des conditions météorologiques locales, à différentes heures ou à différents mois de l'année. Il est extrêmement dangereux de réaliser des expériences réelles avec des tiges d'essai en plein air afin d'étudier l'électricité des nuages. Dans ce livre, nous réaliserons quelques expériences didactiques en utilisant de petits fils métalliques comme tiges d'essai. Les nuages électrisés seront simulés par des électroscopes chargés isolés du sol.

Expérience 11.8 — *Suppression des charges d'un électroscope*

Un fil métallique est fixé verticalement sur une plaque épaisse en polystyrène. L'extrémité inférieure de ce fil doit être située au centre de la plaque et ne doit pas toucher le sol. Ce fil sera isolé de la Terre. L'extrémité supérieure de ce fil sera à l'extérieur de la plaque, à l'air libre. Un électroscope isolé initialement déchargé est soutenu au-dessus du fil, le bord inférieur de son carton étant proche de l'extrémité supérieure du fil, à une distance de 1 à 3 mm de son extrémité. Un versorium métallique est situé près du centre du fil vertical, pointant dans une direction arbitraire, figure 11.8 (a).

L'électroscope est ensuite électrisé en raclant son bord supérieur avec une paille frottée. Sa bande se soulève immédiatement, figure 11.8 (b). Retirez la paille frottée. Après un certain temps, la bande soulevée s'abaisse légèrement et le versorium pointe vers le fil vertical, figure 11.8 (c).

Cette expérience n'est pas liée à l'induction électrostatique. En effet, l'orientation du versorium n'est pas due à la polarisation du fil, qui se produit lorsqu'un électroscope chargé est proche du fil. Supposons que l'électroscope soit chargé négativement. L'extrémité supérieure du fil isolé sera électrisée positivement par induction, tandis que son extrémité inférieure sera électrisée négativement. Cette induction se produit presque immédiatement, simultanément à l'électrisation de l'électroscope.

L'orientation du versorium, en revanche, ne se produit que quelques secondes

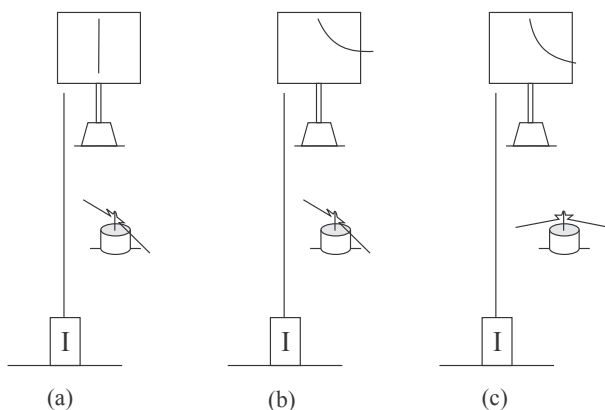


FIG. 11.8 : (a) Fil d'essai vertical isolé du sol. Un versorium situé à proximité de son centre pointe dans une direction arbitraire. L'électroscope est initialement déchargé. (b) Un électroscope chargé. (c) Après un certain temps, la bande s'abaisse légèrement et le fil électrisé oriente le versorium vers elle.

après l'électrisation de l'électroscope. Cette orientation est due à l'électrisation progressive du fil dans son ensemble, qui se produit en raison de l'ionisation de l'air autour de l'extrémité supérieure du fil. Lorsque le fil devient électrisé négativement, il provoque une redistribution des charges dans le versorium voisin, l'orientant vers le fil.

Cette expérience peut également être réalisée avec un fil métallique horizontal soutenu par deux gobelets en polystyrène. Le versorium doit être placé dans le même plan que le fil, à proximité de celui-ci et pointant dans une direction arbitraire, figure 11.9 (a). L'électroscope chargé est ensuite approché très près du fil, son centre se trouvant dans le plan du fil. L'extrémité du fil doit se trouver à une distance de 1 à 3 mm du bord vertical du carton. Après un certain temps, le versorium s'oriente vers le fil, figure 11.9 (b).

11.5 Étincelles dans le mécanisme ACR

Le mécanisme ACR a été abordé dans la section 4.4. Dans ce phénomène, un conducteur isolé et léger est attiré par un corps chargé, il y a communication d'électricité, suivie de la répulsion du conducteur. L'expérience 4.3 a montré un exemple de ce mécanisme. Un petit disque conducteur initialement neutre et isolé du sol a été attiré par un isolant électrisé, l'a touché, puis en a été repoussé. Le disque a acquis une charge de même signe que celle de l'isolant électrisé. L'attraction s'est produite en raison de la polarisation du disque. Cette polarisation a été induite par le plastique électrisé à proximité. Normalement, la communication électrique dans le mécanisme ACR se produit lors du contact entre le petit conducteur et le corps chargé à proximité.

Cependant, ce contact n'est pas toujours nécessaire. En effet, le mécanisme ACR peut se produire sans contact entre le corps chargé et le conducteur isolé. Parfois,

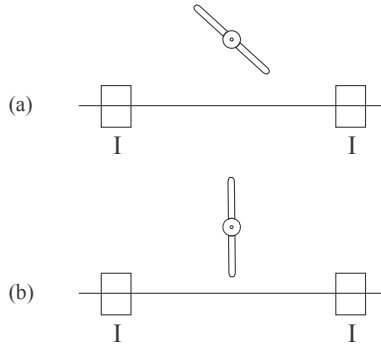


FIG. 11.9 : (a) Tige d'essai horizontale isolée du sol. Un versorium situé à proximité de son centre pointe dans une direction arbitraire. (b) Une fois le fil électrisé, il oriente le versorium, le faisant pointer vers le fil.

lorsque le petit conducteur est suffisamment proche de l'isolant électrisé, il y a un transfert de charges entre eux et l'air ambiant, ce qui électrise le conducteur. Dans ce processus, le petit conducteur acquiert une charge de même signe que celle du corps électrisé proche. Lorsque cette communication de charges a lieu, il y a une répulsion entre le petit conducteur et le corps électrisé, bien qu'ils ne se soient jamais touchés physiquement. Ce qui se passe dans ce cas, c'est que lorsqu'ils sont très proches l'un de l'autre, l'air entre eux peut se comporter comme un conducteur. Il y a alors une petite étincelle dans l'air, avec un échange de particules électrisées entre le petit conducteur, les ions de l'air et l'isolant électrisé. Au bout d'un certain temps, le petit conducteur s'électrise et est alors repoussé par l'isolant.

Du Fay lui-même, qui a découvert le mécanisme ACR, savait que le contact n'était pas nécessaire pour qu'une répulsion se produise. Parfois, le petit conducteur acquerrait une charge nette du même signe que celle du corps électrisé simplement en s'en approchant de très près, sans le toucher.⁶

11.6 Lampe au néon

Il est facile d'acheter dans les magasins d'électroménager une lampe dite « lampe au néon » ou « lampe à incandescence au néon », figure 11.10.

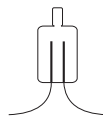


FIG. 11.10 : Lampe au néon.

Il s'agit d'une lampe à décharge gazeuse utilisée comme indicateur dans les équi-

⁶Section 4.8 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

pements électroniques, les testeurs de tension, etc. Dans les expériences électrostatiques, elle peut être utilisée pour indiquer non seulement si un corps est chargé ou déchargé, mais aussi le signe de sa charge, c'est-à-dire si le corps est positif ou négatif.

Expérience 11.9 — *Raclar une lampe au néon sur une règle chargée négativement*

Tenez à la main l'une des pattes d'une lampe au néon et touchez l'autre patte avec une règle acrylique neutre. La lampe ne s'allume pas, figure 11.11 (a).

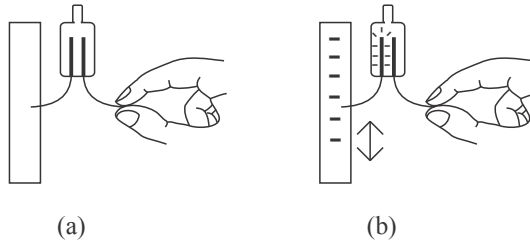


FIG. 11.11 : (a) Une lampe au néon reste éteinte lorsqu'elle touche une règle acrylique neutre. (b) Racler l'une de ses pattes sur une règle chargée négativement. Observez que seule l'électrode connectée à la règle clignote.

Une règle en acrylique est chargée négativement en la frottant dans des cheveux ou avec une serviette en papier ou un mouchoir en coton. Tenez une patte de la lampe néon avec un doigt et touchez l'autre patte sur la partie chargée de la règle, en la raclant le long de la règle dans une pièce sombre. Seule l'électrode connectée à la règle négative clignote, figure 11.11 (b).

Expérience 11.10 — *Toucher une lampe au néon avec des électroscopes chargés positivement et négativement*

Électrisez deux électroscopes, l'un positivement et l'autre négativement. Cette électrisation peut être obtenue en raclant une règle en plastique chargée positivement sur le bord supérieur du carton d'un électroscope et une règle en plastique chargée négativement sur le bord du carton de l'autre électroscope. Ces électrisations opposées des électroscopes peuvent également être facilement obtenues par induction ou polarisation.⁷ Les électroscopes chargés sont ensuite séparés l'un de l'autre.

Tenez une patte de la lampe au néon et touchez l'autre patte à l'électroscope positif dans une pièce sombre. Elle se décharge presque immédiatement. Pendant la décharge, seule l'électrode reliée à la main clignote, figure 11.12 (a).

Répétez la même procédure lorsque vous touchez l'électroscope chargé négativement. Observez que la lampe clignote également pendant la décharge. Cependant, dans ce cas, seule l'électrode connectée à l'électroscope clignote, figure 11.12 (b).

Cette expérience peut être répétée avec un électrophore.⁸ Lorsque le collecteur de charge de l'électrophore est chargé négativement, seule l'électrode qui le touche

⁷Section 7.5 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

⁸[Fersdb, Lâmpada de néon, p. 32; Lâmpada fluorescente, p. 34; et Eletróforo de Volta, p. 38].

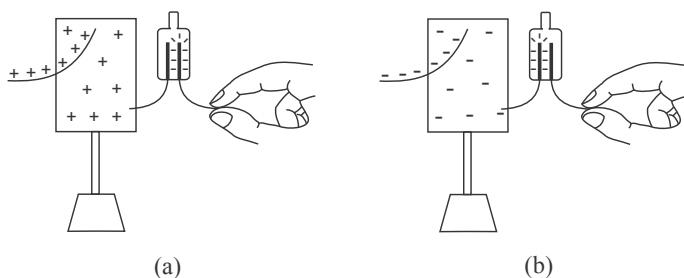


FIG. 11.12 : La lampe clignote lorsqu'une de ses pattes touche un électroscope chargé tandis que l'autre patte est tenue dans la main. (a) Seule l'électrode reliée à la main clignote lorsque l'électroscope est chargé positivement. (b) Seule l'électrode reliée à l'électroscope clignote lorsque l'électroscope est chargé négativement.

clignote. En revanche, lorsque la patte de la lampe au néon touche un électrophore chargé positivement, seule l'électrode reliée à la main de la personne qui tient la lampe clignote.

La lampe au néon est donc un dispositif très utile. Tout d'abord, elle peut indiquer si un certain conducteur est chargé ou déchargé. Lorsque le conducteur est initialement électrisé, la lampe au néon indique également s'il est chargé positivement ou négativement.

11.7 Gray, Franklin, l'effet de pointe et la nature électrique de la foudre

Certains scientifiques précurseurs ont remarqué plusieurs analogies entre les petites étincelles et les décharges électriques qu'ils produisaient lors de leurs expériences électrostatiques et les éclairs observés lors des orages. Ils ont suggéré que ces deux types de phénomènes pouvaient être le même effet, mais avec une différence considérable en termes d'amplitude. L'un de ces chercheurs était Stephen Gray. Dans une lettre adressée au secrétaire de la Royal Society en 1734, publiée en 1735, il décrivait plusieurs expériences liées aux étincelles et aux lumières qu'il avait pu produire avec son tube de verre électrisé, ainsi que lorsque des conducteurs pointus étaient placés très près de corps électrisés. Nous citons ici la dernière partie de son article, avec nos chiffres et nos commentaires dans les notes de bas de page et entre crochets :^{9,10}

⁹[Gra36a, p. 24], [Bos11, chapitre 10] et [BAC12, chapitre 11, pp. 221–238].

¹⁰8. I then took a wooden Dish, and placed it upon the Stand first empty ; then applying the Tube [that is, a rubbed glass tube], and the Fin-[ger] near the Dish, there appeared a Light, but no pushing of the Finger nor Snapping : I then filled the Dish with Water, and the Tube being held over the Surface of the Water, there appeared a greater Light than when the Finger had been applied to the empty Dish, but no Snapping, till by holding the Tube after it had been well rubbed, within two or three Inches of the Finger that was held near the Surface of the water, and then the Finger was pushed, and a snapping Noise heard, as when the Experiment was made with the Pewter Plate.

8. J'ai ensuite pris un bol en bois et l'ai placé sur le support¹¹ d'abord vide ; puis, en appliquant le tube [c'est-à-dire un tube en verre frotté] et le doigt près du bol, une lumière est apparue, mais sans pression du doigt ni claquement : J'ai ensuite rempli le bol d'eau, et le tube étant maintenu au-dessus de la surface de l'eau, une lumière plus intense est apparue que lorsque le doigt avait été appliqué sur le bol vide, mais sans claquement,¹² jusqu'à ce que, après avoir bien frotté le tube, je le tiens à deux ou trois pouces [5 ou 7 cm] du doigt qui était tenu près de la surface de l'eau, puis que j'appuie sur le doigt et qu'un claquement se fasse entendre, comme lors de l'expérience réalisée avec l'assiette en étain.¹³

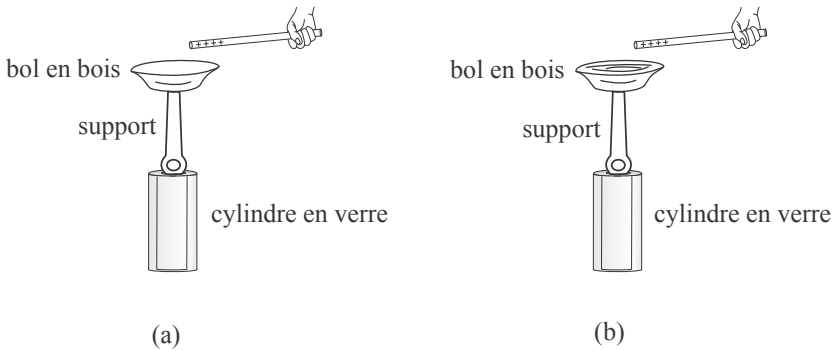


FIG. 11.13 : (a) Cylindre en verre, support et bol en bois vide. (b) Cylindre en verre, support et bol en bois rempli d'eau.

Gray a poursuivi sa description de l'expérience avec les mots suivants :¹⁴

Ces expériences nous montrent qu'une véritable flamme de feu, accompagnée d'une explosion et d'une ébullition d'eau froide,¹⁵ peut être produite par l'électricité communicative ; et bien que ces effets ne soient pour l'instant que *minimis*, il est probable qu'avec le temps, on trouvera un moyen d'en collecter une plus grande quantité et, par conséquent, d'augmenter la force de ce feu électrique,¹⁶

¹¹Dans cet article, Gray mentionne que ce support était posé sur un cylindre en verre. Son cylindre en verre agissait comme un isolant.

¹²La figure 11.13 illustre à quoi pourrait ressembler cette expérience.

¹³La figure 11.14 illustre à quoi pourrait ressembler cette expérience.

¹⁴By these Experiments we see, that an actual Flame of Fire, together with an Explosion, and an Ebullition of cold Water, may be produced by Communicative Electricity ; and altho' these Effects are at present but in *minimis*, it is probable, in Time there may be found out a Way to collect a greater Quantity of it ; and consequently to increase the Force of this Electric Fire, which, by several of these Experiments (*Si licet magnis componere parva*) seems to be of the same Nature with that of Thunder and Lightning.

¹⁵Cette « flamme de feu » fait probablement référence à l'étincelle ou à la lumière émise par les objets, l'« explosion » au bruit sec entendu, tandis que l'« ébullition de l'eau froide » désigne les gouttes d'eau recueillies à la surface du tube lorsqu'il était maintenu près de la surface de l'eau.

¹⁶Des expériences ultérieures avec la bouteille de Leyde ont confirmé les prédictions de Gray, voir le chapitre 12. Il était alors possible de collecter de l'électricité et de la stocker pendant longtemps. Il était également possible d'augmenter la taille et la puissance des étincelles électriques produites expérimentalement.

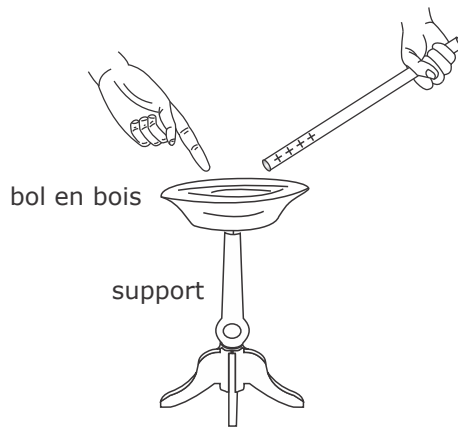


FIG. 11.14 : Un doigt placé près de la surface de l'eau. Lorsqu'un tube en verre bien frotté était placé à 5 ou 7 cm du doigt, celui-ci était poussé et un bruit sec se faisait entendre.

qui, grâce à plusieurs de ces expériences (*Si licet magnis componere parva*)¹⁷ semble être de même nature que celle du tonnerre et de la foudre.¹⁸

Gray a décrit plusieurs autres expériences reliant l'effet de pointe aux étincelles dans l'air. Il a également réalisé plusieurs expériences liées à la conservation des charges électriques.¹⁹ Ces expériences ne seront pas abordées dans cet ouvrage.

Benjamin Franklin (1706–1790) était un autodidacte qui a travaillé dans de nombreux domaines différents. Entre 1743 et 1753, il s'est consacré à des expériences électriques après avoir assisté à plusieurs conférences publiques sur ce sujet.²⁰ Il reçut en cadeau un tube de verre qui pouvait être facilement électrisé par friction et qui se comportait comme un bon isolant. Il acquit également certains des principaux instruments électriques de son époque. Il informa ses collègues européens de ses expériences menées à Philadelphie par le biais de lettres qui furent largement lues et discutées. Elles furent rassemblées et publiées sous forme de livre à Londres en 1751. Cet ouvrage a été augmenté et publié en plusieurs éditions jusqu'en 1774, sous le titre : *Experiments and Observations on Electricity*.²¹ Ce livre a eu un grand impact et a été traduit en plusieurs langues. Il a inventé un certain nombre de termes scientifiques dans le domaine de l'électricité, tels que « plus et moins » ou « positif et négatif », « batterie », etc. Il a expliqué le mécanisme de fonctionnement d'une bouteille de Leyde, a popularisé l'utilisation d'un condensateur à plaques parallèles, a beaucoup insisté sur l'effet de pointe et a été l'un des principaux scientifiques à l'origine de l'établissement et de

¹⁷Cette citation est tirée d'un poème du poète romain Virgile (70–19 av. J.-C.), *Georgiques*, 4.176. Traduction libre : « Si nous pouvons comparer les petites choses aux grandes. »

¹⁸La suggestion de Gray a été confirmée dans les années 1750 par les expériences menées selon les idées de Benjamin Franklin.

¹⁹[Bos11] et [BAC12] ; voir également la section 6.10 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

²⁰[Hei99, chapitre 14], [SP06], [SP08] et [MB17].

²¹[Fra69], [Fra41] et [Mor04b].

l'utilisation de la loi de conservation des charges électriques.²² Il a donné plusieurs noms aux particules électrisées, tels que « feu électrique », « matière électrique » et « fluide électrique ». Il a travaillé avec le concept d'un fluide électrique unique. Il pensait que toutes les substances contenaient une quantité ou une densité normale de ce fluide. Lorsqu'un corps contenait plus de fluide électrique que cette quantité normale, il était « électrisé positivement ». De même, s'il contenait moins de fluide électrique que cette quantité normale, il était « électrisé négativement ». De nos jours, les gens utilisent sa nomenclature, mais avec une signification différente, à savoir en supposant l'existence de deux types d'électricité ou de deux types de charge électrique.

Avec sa conception de la conservation des charges électriques, Franklin soulignait que l'électricité n'était ni créée, ni générée, ni produite lors du frottement entre deux substances, ni dans aucun autre processus d'électrisation. La seule chose qui se produisait lors du frottement ou de tout autre processus d'électrisation était une redistribution ou un transfert de charge. Autrement dit, l'un des corps recevait exactement la même quantité de fluide électrique que celle perdue par l'autre corps.

Dans sa première lettre de 1747, Franklin décrivait « l'effet merveilleux des corps pointus, tant pour attirer que pour repousser le feu électrique ». Il a d'abord présenté une expérience dans laquelle un conducteur pointu et mis à la terre extrayait le fluide électrique d'un autre conducteur électrisé qui était isolé de la terre, nos mots dans les notes de bas de page :^{23,24}

Placez une boule de fer de trois ou quatre pouces [7 ou 10 cm] de diamètre sur l'embouchure d'une bouteille en verre propre et sèche.²⁵ À l'aide d'un fin fil de soie suspendu au plafond, juste au-dessus de l'embouchure de la bouteille, suspendez une petite boule de liège, de la taille d'une bille ; le fil doit être suffisamment long pour que la boule de liège puisse reposer contre le côté de la boule de fer. Électrifiez la boule de fer et la boule de liège sera repoussée à une distance de quatre ou cinq pouces [10 ou 12 cm], plus ou moins, selon la quantité d'électricité.—Dans cet état, si vous présentez à la bille la pointe d'un poinçon fin et acéré, à une distance de six à huit pouces [15 à 20 cm], la répulsion est instantanément détruite et le bouchon vole vers la bille. Un corps émoussé doit être approché à moins d'un pouce [2,5 cm] et produire une étincelle pour obtenir le même effet. Pour prouver que le feu électrique est attiré par la pointe, si vous retirez la lame de l'alène du manche en bois et que vous la fixez dans un bâton de cire à cacheter, puis que vous la présentez à la distance susmentionnée, ou si vous l'approchez très près,

²² [Coh66], [Coh96] et [Hei99, chapitre 14 : Benjamin Franklin].

²³ [Fra69, Letter II, pp. 3-4], [Coh96, pp. 23-24], [Hei99, pp. 327-328] et [MB17].

²⁴ Place an iron shot of three or four inches diameter on the mouth of a clean dry glass bottle. By a fine silken thread from the ceiling, right over the mouth of the bottle, suspend a small cork-ball, about the bigness of a marble ; the thread of such a length, as that the cork-ball may rest against the side of the shot. Electrify the shot, and the ball will be repelled to the distance of four or five inches, more or less, according to the quantity of Electricity.—When in this state, if you present to the shot the point of a slender sharp bodkin, at six or eight inches distance, the repellency is instantly destroyed, and the cork flies to the shot. A blunt body must be brought within an inch, and draw a spark, to produce the same effect. To prove that the electrical fire is drawn off by the point, if you take the blade of the bodkin out of the wooden handle, and fix it in a stick of sealing-wax, and then present it at the distance aforesaid, or if you bring it very near, no such effect follows ; but sliding one finger along the wax till you touch the blade, and the ball flies to the shot immediately.

²⁵ Cette bouteille en verre agit comme un isolant.

aucun effet de ce type ne se produit ; mais si vous faites glisser un doigt le long de la cire jusqu'à toucher la lame, la bille vole immédiatement vers le projectile.²⁶

Sa première description d'un conducteur pointu émettant du fluide électrique :^{27,28}

Pour montrer que les pointes peuvent *repousser** ainsi que d'*attirer* le feu électrique ; posez une longue aiguille pointue sur le projectile, et vous ne pourrez pas l'électriser de manière à ce qu'il repousse la bille en liège.

* Ce pouvoir des pointes de *repousser* le feu électrique m'a été communiqué pour la première fois par mon ingénieux ami M. *Thomas Hopkinson*, aujourd'hui décédé, dont la vertu et l'intégrité, dans tous les domaines de la vie, publique et privée, feront toujours que sa mémoire restera chère à ceux qui l'ont connu et qui savent l'apprécier.

Cette expérience a de nouveau utilisé une bille de fer isolée du sol, car elle était soutenue par une bouteille en verre. Malgré cela, il n'a pas été possible d'électriser la bille, car tout fluide électrique acquis est perdu dans l'air à travers la longue aiguille pointue.

Il a présenté une expérience similaire illustrant l'émission du fluide électrique, à savoir :^{29,30}

Ou fixez une aiguille à l'extrémité d'un canon suspendu ou d'une tige de fer, de manière à ce qu'elle dépasse comme une petite baïonnette† ; tant qu'elle reste en place, le canon ou la tige ne peut être électrisé en appliquant le tube à l'autre extrémité de manière à produire une étincelle, le feu s'échappant continuellement et silencieusement à cette extrémité.

† Il s'agissait d'une expérience de M. *Hopkinson*, réalisée dans l'espoir de produire une étincelle plus vive et plus puissante à partir de la pointe, comme à partir d'une sorte de foyer, et il fut surpris de constater qu'il n'y en avait que peu ou pas du tout.

Une fois de plus, la pointe conductrice empêche l'accumulation de charges sur la tige métallique.

L'expérience précédente, dans laquelle Franklin avait extrait le fluide électrique d'un conducteur isolé et électrisé à l'aide d'un autre conducteur pointu et mis à la

²⁶La cire à cacheter est un isolant. Dans cette expérience, la lame métallique n'est plus mise à la terre au départ, car la cire à cacheter agit ici comme une poignée isolant la lame de la main de Franklin. La lame n'est mise à la terre que lorsque le doigt la touche. À ce moment-là, la décharge du projectile de fer a lieu.

²⁷[Fra69, p. 5] et [Coh96, pp. 23–24].

²⁸To shew that points will *throw off** as well as *draw off* the electrical fire ; lay a long sharp needle upon the shot, and you cannot electrify the shot, so as to make it repel the cork-ball.

* This power of points to *throw off* the electrical fire, was first communicated to me by my ingenious friend Mr. *Thomas Hopkinson*, since deceased, whose virtue and integrity, in every station of life, public and private, will ever make his Memory dear to those who knew him, and know how to value him.

²⁹[Fra69, p. 5] et [Coh96, p. 24].

³⁰Or fix a needle to the end of a suspended gun-barrel, or iron-rod, so as to point beyond it like a little bayonet† ; and while it remains there, the gun-barrel, or rod, cannot by applying the tube to the other end be electrified so as to give a spark, the fire continually running out silently at the point.

† This was Mr. *Hopkinson's* Experiment, made with an expectation of drawing a more sharp and powerful spark from the point, as from a kind of focus, and he was surprized to find little or none.

terre, l'avait inspiré. En raisonnant de manière analogue, il suggéra de tester l'idée selon laquelle la foudre pourrait être un effet similaire, mais à une échelle beaucoup plus grande. Dans une lettre de 1750, publiée en 1751, il proposa l'expérience de la guérite afin de tester l'électrisation des nuages, nos mots entre crochets :^{31,32}

21. Pour déterminer si les nuages contenant des éclairs sont électrisés ou non, je proposerais de réaliser une expérience là où cela peut être fait facilement. Au sommet d'une tour ou d'un clocher, placez une sorte de guérite (comme dans la Fig. 9 [voir figure 11.15]) suffisamment grande pour contenir un homme et un support électrique [c'est-à-dire un support isolant]. Au milieu du support, faites passer une tige de fer qui dépasse de la porte, puis remonte à la verticale sur 20 ou 30 pieds [6 ou 9 m], avec une extrémité très pointue. Si le support électrique est maintenu propre et sec, un homme debout dessus lorsque de tels nuages passent à basse altitude pourrait être électrisé et produire des étincelles, la tige attirant vers lui le feu provenant d'un nuage. Si un danger devait être appréhendé pour l'homme (bien que je pense qu'il n'y en ait aucun), qu'il se tienne debout sur le sol de sa boîte et qu'il approche de temps en temps de la tige la boucle d'un fil dont une extrémité est fixée aux fils conducteurs, en la tenant par une poignée en cire [c'est-à-dire par une poignée isolante] ; ainsi, si la tige est électrisée, les étincelles jailliront de la tige vers le fil et ne l'affecteront pas.



Fig. 11.15 : L'expérience de la guérite suggérée par Franklin.

Franklin n'a pas réalisé cette expérience. Elle a été réalisée pour la première fois en mai 1752 dans la ville de Marly, en France, inspirée par la lettre de Franklin. Elle

³¹[Fra69, pp. 65–66], [Coh96, p. 70], [Hei99, pp. 340–341] et [SP06].

³²21. To determine the question, whether the clouds that contain lightning are electrified or not, I would propose an experiment to be tried where it may be done conveniently. On the top of some high tower or steeple, place a kind of sentry-box (as in Fig. 9) big enough to contain a man and an electrical stand [that is, an insulating stand]. From the middle of the stand let an iron rod rise and pass bending out of the door, and then upright 20 or 30 feet, pointed very sharp at the end. If the electrical stand be kept clean and dry, a man standing on it when such clouds are passing low, might be electrified and afford sparks, the rod drawing fire to him from a cloud. If any danger to the man should be apprehended (though I think there would be none) let him stand on the floor of his box, and now and then bring near to the rod the loop of a wire that has one end fastened to the leads, he holding it by a wax handle [that is, by an insulating handle] ; so the sparks, if the rod is electrified, will strike from the rod to the wire, and not affect him.

a été réalisée par le traducteur français de son livre, T. F. D'Alibard (1709–1778). La description de l'expérience a été publiée peu après, nos commentaires figurant entre crochets :^{33,34}

M. D'Alibard choisit, à cette fin, un jardin situé à *Marly*, où il plaça sur un corps électrique [c'est-à-dire sur un isolant] une barre de fer pointue, haute de 40 pieds [12 m]. Le 10 *mai*, à 14 h 20, un nuage orageux étant passé au-dessus de l'endroit où se trouvait la barre, ceux qui avaient été chargés de l'observer s'en approchèrent et en tirèrent des étincelles de feu, percevant le même genre de perturbations que dans les expériences électriques courantes.

M. De Lor, conscient du succès de cette expérience, décida de la répéter chez lui, à l'Estrapade, à Paris. Il éleva une barre de fer de 99 pieds [30 m] de haut, placée sur un bloc de résine [isolant] de deux pieds carrés [0,4 m²] et trois pouces [7 cm] d'épaisseur. Le 18 *mai*, entre quatre et cinq heures de l'après-midi, un nuage orageux passa au-dessus de la barre, où il resta une demi-heure, et il tira de la barre des étincelles semblables à celles du canon, lorsque, dans les expériences électriques, le globe est seulement frotté par le coussin [d'un générateur électrique à friction], et elles ont produit le même bruit, le même feu et le même crépitement. Ils ont tiré les étincelles les plus fortes à une distance de neuf lignes, tandis que la pluie, mêlée à un peu de grêle, tombait du nuage, sans tonnerre ni éclairs; ce nuage n'étant, selon toute apparence, que la conséquence d'un orage qui s'était produit ailleurs.

D'Alibard a inclus une représentation de l'expérience de Marly dans la deuxième édition de la traduction française du livre de Franklin, figure 11.16. Le principal aspect à retenir dans cette expérience est que la barre de fer conductrice était isolée électriquement du sol. Cette isolation était assurée par les cordes de soie qui attachaient la barre et également par les bouteilles de vin vides placées entre le petit banc et la planche de bois sur laquelle reposait l'extrémité inférieure de la barre.

En raison de l'effet de pointe, lorsqu'il y avait une haute tension entre le nuage électrisé et la barre de fer, l'air proche de l'extrémité supérieure de la barre se comportait comme un conducteur. La barre conductrice isolée recueillait alors une petite partie de l'électricité du nuage. Lorsqu'un conducteur mis à la terre était approché de la barre, des étincelles se produisaient. Ces étincelles avaient les mêmes propriétés que les décharges habituelles obtenues dans les expériences électrostatiques. Ces

³³[Fra69, p. 107], [Coh96, pp. 127–130] et [Hei99, pp. 349–351].

³⁴M. D'Alibard chose, for this purpose, a garden situated at *Marly*, where he placed upon an electrical body [that is, upon an insulator] a pointed bar of iron, of 40 feet high. On the tenth of *May*, 20 minutes past two in the afternoon, a stormy cloud having passed over the place where the bar stood, those, that were appointed to observe it, drew near, and attracted from it sparks of fire, perceiving the same kind of commotions as in the common electrical experiments.

M. De Lor, sensible of the good success of this experiment, resolved to repeat it at his house in the *Estrapade* at *Paris*. He raised a bar of iron 99 feet high, placed upon a cake of resin [insulator], two feet square, and three inches thick. On the 18th of *May*, between four and five in the afternoon, a stormy cloud having passed over the bar, where it remained half an hour, he drew sparks from the bar, like those from the gun barrel, when, in the electrical experiments the globe is only rubbed by the cushion [of a frictional electric generator], and they produced the same noise, the same fire, and the same crackling. They drew the strongest sparks at the distance of nine lines, while the rain, mingled with a little hail, fell from the cloud, without either thunder or lightning; this cloud being, according to all appearance, only the consequence of a storm, which happened elsewhere.

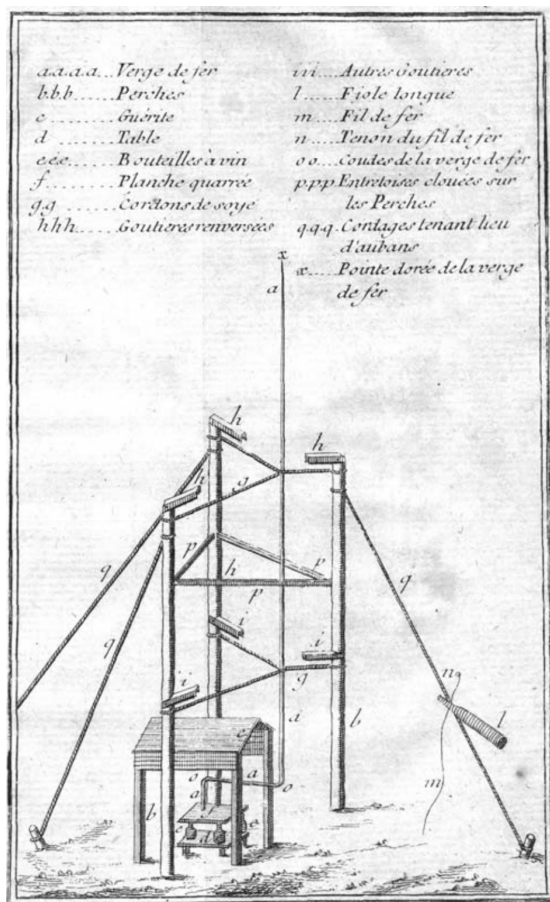


FIG. 11.16 : Barre de fer isolée du sol.

expériences ont été les premières à prouver l'identité de la foudre avec l'électricité. Certains scientifiques antérieurs, comme Stephen Gray, avaient déjà présenté cette conjecture, mais Franklin a été le premier à proposer une expérience spécifique pour tester cette suggestion. D'Alibard a réalisé son expérience sous l'influence directe de la prédiction de Franklin. Des expériences similaires ont rapidement été menées dans plusieurs pays à l'aide de barres conductrices isolées du sol.

Les expériences 11.1, 11.2 et 11.8 sont similaires à l'expérience de Marly, bien qu'à une échelle beaucoup plus petite. Nous n'avons pas produit d'étincelles dans ces expériences. Cependant, l'électrisation d'un électroscope et l'orientation d'un versorium par le fil d'essai indiquent certains effets qui se produisent dans un conducteur isolé dont l'une des extrémités est proche d'un autre corps électrisé.

Il est évident qu'il est très dangereux de réaliser des expériences comme celles de Marly en plein air en utilisant des barres conductrices isolées du sol. En 1753, le scientifique russe d'origine allemande G. W. Richmann (1711–1753) est mort à

Saint-Pétersbourg à la suite d'une décharge soudaine de sa barre isolée alors qu'il réalisait des expériences de ce type pendant un orage.³⁵

En 1752, Franklin a également suggéré une expérience avec un cerf-volant pour tester l'électricité des nuages. Des expériences de ce type furent rapidement menées par plusieurs scientifiques.³⁶

Franklin était tout à fait convaincu de l'identité entre la foudre et les étincelles habituelles, avant même que cette conjecture ne soit confirmée en 1752 par l'expérience de Marly. Dans une lettre de 1750 adressée à son ami Peter Collinson (1694–1768) et publiée peu après, il proposait la construction de paratonnerres afin de protéger les bâtiments contre les décharges électriques. Il existe une grande différence entre les paratonnerres de protection et les tiges d'essai, comme indiqué dans les sections 11.3 et 11.4. Les paratonnerres sont mis à la terre, tandis que les tiges d'essai sont isolées de la terre. Les tiges d'essai peuvent être utilisées pour collecter une petite quantité d'électricité provenant des nuages ou de l'atmosphère. Les paratonnerres ne sont pas destinés à collecter de l'électricité, mais à protéger les bâtiments. Première suggestion de Franklin concernant un paratonnerre de protection :^{37,38}

... la connaissance de cet effet de pointe ne pourrait-il pas être utile à l'humanité pour préserver les maisons, les églises, les navires, etc. contre la foudre, en nous indiquant de fixer sur les parties les plus élevées de ces édifices des tiges de fer droites, affûtées comme des aiguilles et dorées pour éviter la rouille, et depuis le pied de ces tiges, un fil métallique descendant à l'extérieur du bâtiment jusqu'au sol, ou descendant autour d'un des haubans d'un navire, et le long de son flanc jusqu'à atteindre l'eau ? Ces tiges pointues n'attireraient-elles pas silencieusement le feu électrique hors des nuages avant qu'il ne s'approche suffisamment pour frapper, nous protégeant ainsi de ce malheur soudain et terrible ?

L'expérience 11.7 illustre à petite échelle le mécanisme de fonctionnement d'un paratonnerre. L'électroscope chargé est déchargé par un fil relié à la terre situé à proximité. La décharge n'affecte pas la maison voisine, qui est isolée du fil.

Les premiers paratonnerres ont été construits en Europe et en Amérique du Nord en 1752, peu après l'expérience de Marly.³⁹ L'invention du paratonnerre a apporté une grande renommée à Franklin et a motivé l'étude de l'électricité atmosphérique non seulement par temps orageux, mais aussi par temps sec, constituant l'une des premières applications pratiques à grande échelle de la recherche sur l'électricité.

³⁵ [Coh96, pp. 5–6, 84–85, 113, 135 et 157], [Hei99, pp. 352, 390, 391 et 460] et [Lom17].

³⁶ [Coh96, pp. 5, 28, 67–70, 97, 125 et 130], [Hei99, p. 351] et [SP06].

³⁷ [Fra69, p. 65] et [Coh96, p. 83].

³⁸ ... may not the knowledge of this power of points be of use to mankind, in preserving houses, churches, ships, &c. from the stroke of lightning, by directing us to fix on the highest parts of those edifices, upright rods of iron made sharp as a needle, and gilt to prevent rusting, and from the foot of those rods a wire down the outside of the building into the ground, or down round one of the shrouds of a ship, and down her side till it reaches the water ? Would not these pointed rods probably draw the electrical fire silently out of a cloud before it came nigh enough to strike, and thereby secure us from that most sudden and terrible mischief ?

³⁹ [Coh96, pp. 29, 67, 74, 82–83, 91 et 109].

11.8 Applications de l'effet de pointe

L'effet de pointe a été appliquée dans de nombreuses situations. Voici quelques exemples :

- Dans ce livre, l'effet de pointe a été utilisée chaque fois qu'un électroscope a été chargé à l'aide d'une paille frottée raclant le bord du carton. Nous obtenons une électrisation plus efficace en raclant la paille sur le bord du carton plutôt que sur ses parties émoussées. Après tout, le bord est plus tranchant que le corps du rectangle en carton. Pendant le processus de raclement, le transfert de particules électrisées peut avoir lieu non seulement pendant le contact entre la paille frottée et le carton, mais aussi lorsque la paille et le carton sont très proches l'un de l'autre, sans contact. Dans cette dernière situation, l'électrisation a lieu lorsque l'air entre le bord tranchant et la paille électrisée s'ionise. L'air ionisé se comporte comme un conducteur, facilitant l'échange de particules électrisées.⁴⁰
- Paratonnerres.
- Une application importante se trouve dans le microscope à émission de champ, un appareil inventé en 1936 par le physicien Erwin Wilhelm Müller (1911–1977).
- Il est utilisé dans les moteurs électrostatiques et dans les phénomènes associés à ce qu'on appelle le « vent électrique ».⁴¹
- Dans les photocopieurs.
- Dans les générateurs Van de Graaff.
- Dans les microscopes à force atomique.
- Etc.

⁴⁰[FM91, p. 61].

⁴¹[Jef71b], [Jef71a], [JW71] et [Jef73].

Chapitre 12

La bouteille de Leyde et les condensateurs

12.1 Fabrication d'un condensateur

Cette section montre comment construire un dispositif électrique très important appelé « condensateur » ou « condensateur électrique ». Il stocke des charges et de l'énergie électrique. Le premier dispositif de ce type, appelé « bouteille de Leyde », a été construit en 1745 et est présenté dans la section 12.5.

Un condensateur est un dispositif composé essentiellement de deux conducteurs séparés par un isolant. Généralement, l'isolant est fin et les conducteurs ont des faces parallèles, presque superposées l'une à l'autre. Il peut avoir plusieurs formes : plaques parallèles, cylindrique, bouteille ou jarre, etc. Avant de commencer la construction, vérifiez que le matériau qui sera utilisé comme isolant se comporte réellement de cette manière. Ce test est très important. À cette fin, utilisez la procédure indiquée dans la figure 3.4. Si ce matériau ne décharge pas un électroscope électrisé lorsqu'il le touche pendant environ 30 secondes, il peut être considéré comme un bon isolant. À partir de maintenant, nous utiliserons comme isolants des assiettes, des bouteilles et des bocaux en plastique ou en polystyrène.

Le condensateur le plus simple est le condensateur à plaques parallèles. Il a été inventé par des personnes liées à Benjamin Wilson (1721–1788) et popularisé par Benjamin Franklin.¹ Franklin a utilisé une plaque de verre comme isolant. Dans cet ouvrage, l'isolant sera une lame de plastique rigide, comme une assiette de fête d'anniversaire, ou une fine plaque de polystyrène. Un rectangle (ou un disque) de feuille d'aluminium doit être collé de chaque côté du rectangle (ou du disque) en plastique. Les feuilles conductrices doivent être légèrement plus petites que le plastique et ne doivent pas se toucher, figure 12.1.

Un dispositif très courant, généralement appelé « bouteille de Leyde », peut être fabriqué à partir d'une bouteille en plastique de 200 ou 300 ml contenant de l'eau.²

¹ [Hei99, p. 317, note 31 et pp. 333–334, note 29].

² [MFsd].

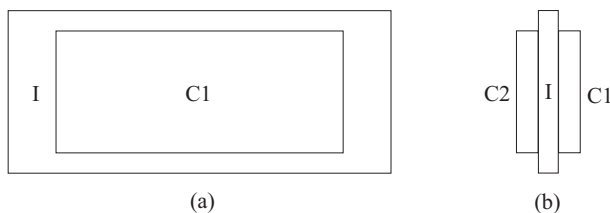


FIG. 12.1 : (a) Condensateur à plaques parallèles rectangulaires vu de dessus : conducteur C_1 au-dessus de l'isolant I . Il existe un autre conducteur C_2 sous l'isolant (non représenté sur la figure de gauche). (b) Système vu de profil.

Une bande de feuille d'aluminium doit être collée sur la face extérieure de la bouteille, couvrant environ les trois quarts de la face latérale, en faisant un tour complet autour de la bouteille. Percez un trou au centre du bouchon en plastique. Passez un fil métallique, un clou ou une longue vis dans ce trou. Idéalement, la vis devrait avoir une tête arrondie au-dessus du couvercle afin d'éviter les pertes dues à l'effet de pointe lorsque le système est électrisé. La tête peut être sphérique, comme une boule métallique, ou en forme de crochet. Le conducteur interne peut être simplement de l'eau du robinet. Il est également possible de remplir le bocal de feuille d'aluminium ou de laine d'acier. Le fil métallique, le clou ou la vis doit pénétrer dans l'eau, la feuille d'aluminium ou la laine d'acier, figure 12.2.

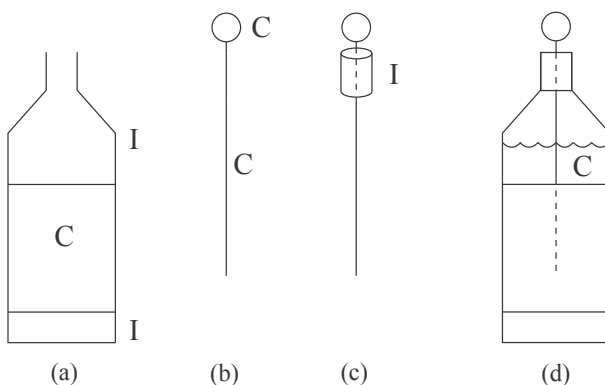


FIG. 12.2 : (a) Bouteille en plastique isolante I entourée d'une bande conductrice C sur la face extérieure. (b) Vis conductrice C à tête arrondie. (c) Vis passant à travers un trou au centre du bouchon isolant I . (d) Condensateur monté rempli d'un matériau conducteur C (eau, feuille d'aluminium ou laine d'acier).

De nombreux autres types de condensateurs peuvent être fabriqués de manière similaire. Quelques exemples :³ (a) Utilisation de pots de yaourt en plastique recouverts de feuille d'aluminium à l'extérieur. Le pot est rempli de feuille d'aluminium.

³[FM91, pp. 76–83], [Fersdb, Garrafa de Leyden, p. 31] et [Fersdc, pp. 73–79].

(b) Utilisation de petits pots cylindriques en plastique (comme ceux de vitamine C ou de fil dentaire). Une feuille d'aluminium est collé à l'extérieur, avec de la laine d'acier à l'intérieur. (c) Une paille en plastique avec de la feuille d'aluminium à l'intérieur et à l'extérieur, etc. Le conducteur interne est relié à l'extérieur par un clou, un fil métallique, un support ou un trombone passant par le centre du couvercle ou du couvercle en plastique.

Le condensateur est un dispositif qui stocke la charge électrique et l'énergie. Nous pouvons établir les définitions suivantes :

Définition 12.1

On dit qu'un condensateur est « chargé », « alimenté » ou « électrisé » lorsqu'il y a une charge électrique $Q \neq 0$ sur le conducteur interne et une charge électrique $-Q$ sur le conducteur externe. Un condensateur est « déchargé » lorsqu'il n'y a aucune charge sur le conducteur interne ni sur le conducteur externe, c'est-à-dire lorsque $Q = -Q = 0$.

Dans la première situation, $Q \neq 0$, tandis que dans la seconde, $Q = 0$. Dans les deux cas, il n'y a pas de charge nette sur l'ensemble du système, $Q + (-Q) = 0$, que le condensateur soit chargé ($Q \neq 0$) ou déchargé ($Q = 0$). La différence entre ces deux situations est que lorsque le condensateur est chargé, il y a une énergie électrique stockée dans le système qui peut produire de nombreux effets (étincelles, chocs électriques, etc.). Comme il n'y a pas de charge totale dans les deux situations, il serait plus approprié de dire que le condensateur est « électriquement polarisé » dans la première situation. Cependant, comme on dit généralement que le condensateur est « chargé électriquement » dans la première situation, nous conserverons cette nomenclature. Dans tous les cas, il faut garder à l'esprit que dans les deux situations, il n'y a pas de charge nette dans le système dans son ensemble, même lorsque le condensateur est dit chargé.

12.1.1 N'utilisez pas de bouteille en verre pour isoler le conducteur interne du conducteur externe

Il convient ici de souligner une fois encore que la plupart des types de verres modernes se comportent comme des conducteurs dans les expériences habituelles d'électrostatique, section 4.3. Nous connaissons certaines personnes qui ont essayé de construire des bouteilles de Leyde à partir de bouteilles en verre et qui n'ont pas réussi à reproduire certaines expériences simples. Le terme « bouteille » suggère une bouteille en verre. Beaucoup de gens pensent que le verre, le bois et l'eau sont des isolants, car les manuels scolaires présentent leurs constantes diélectriques. Cependant, la plupart des matériaux modernes en verre ou en bois se comportent comme des conducteurs. Si nous utilisons une bouteille en verre conductrice pour construire une bouteille de Leyde, elle n'accumulera pas de charges opposées sur ses parties internes et externes. Par conséquent, les expériences réalisées avec ces bouteilles conductrices ne fonctionneront pas, voir également la section 6.3.

Afin d'utiliser une bouteille en verre pour construire un condensateur ou une bouteille de Leyde, nous devons d'abord tester son comportement conducteur. Seuls les types de verre spécifiques qui se comportent comme de bons isolants peuvent être utilisés dans ces dispositifs. Le comportement conducteur de tout matériau peut être testé à l'aide d'un simple électroscope, section 3.1, expérience 3.3, figure 3.4.

12.2 Expériences avec le condensateur

Expérience 12.1 — Charge et décharge d'un condensateur

Utilisez un petit condensateur cylindrique fabriqué à partir d'un pot en plastique, comme ceux utilisés pour le fil dentaire, d'environ 5 cm de hauteur et 3 cm de diamètre. Une bande de feuille d'aluminium est collée à l'extérieur, le cylindre étant rempli de laine d'acier, figure 12.3 (a). Cette laine d'acier doit être en contact avec le clou qui traverse le centre du couvercle en plastique, la tête du clou se trouvant à l'extérieur, figure 12.3 (b).

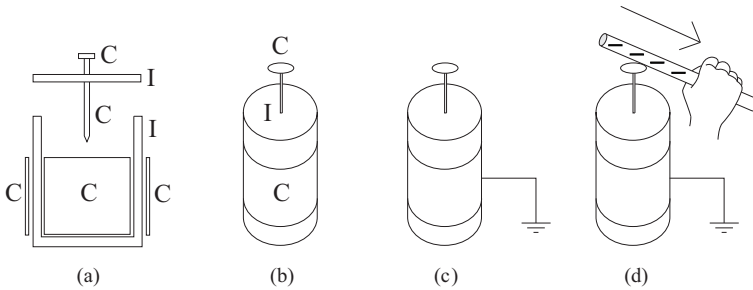


FIG. 12.3 : (a) Condensateur cylindrique composé de conducteurs C et d'isolants I . (b) Système monté. (c) Condensateur mis à la terre. (d) Racler une paille électrisée sur la tête d'un clou.

Électrisez une paille ou une règle en acrylique en la frottant dans des cheveux ou avec une serviette ou un mouchoir en coton. Reliez le condensateur à la terre. Pour ce faire, tenez le cylindre tout en touchant la bande externe de feuille d'aluminium, figure 12.3 (c). Racler la paille frottée avec l'autre main sur la tête du clou, figure 12.3 (d). Cette procédure doit être répétée plusieurs fois pour charger le condensateur.

À partir de maintenant, considérez que le condensateur a été chargé ou électrisé. Tenez la bande de feuille d'aluminium du cylindre à la main. La main conductrice est représentée par la lettre C dans la figure 12.4 (a). Approchez un doigt de la tête du clou. Lorsqu'ils sont très proches l'un de l'autre, nous ressentons un petit choc. Parfois, nous pouvons voir une étincelle dans une pièce sombre et entendre un bruit sec lors de la décharge, figure 12.4 (b).

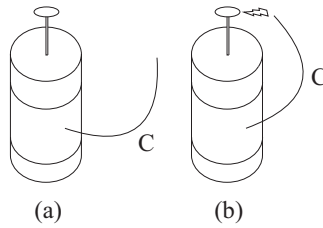


FIG. 12.4 : (a) Condensateur chargé avec une main conductrice C reliée à la bande de feuille d'aluminium. (b) Une étincelle se produit lorsqu'un doigt est approché de la tête du clou.

Expérience 12.2 — Décharger un condensateur sans prendre de choc électrique

Il est possible de réaliser l'expérience 12.1 sans ressentir de chocs.⁴ Une extrémité du conducteur doit être fixée sur la bande de feuille d'aluminium. Les autres parties du conducteur doivent être éloignées de la tête du clou. Ce conducteur peut être un fil de cuivre, une attache-papier ou un support métallique, comme dans la figure 12.5 (b).

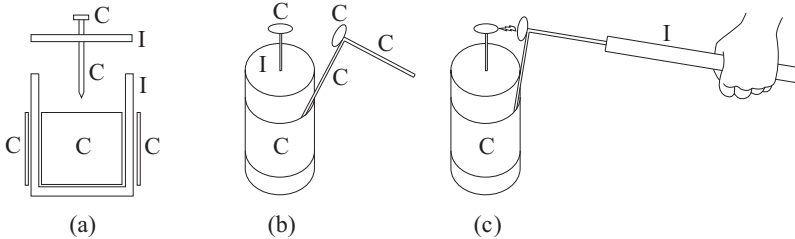


FIG. 12.5 : (a) Condensateur cylindrique composé de conducteurs C et d'isolants I . (b) Système monté avec une attache-papier reliée à la bande de feuille d'aluminium. La tête de l'attache-papier est éloignée de la tête du clou. (c) Une étincelle se produit lorsque la tête de l'attache-papier s'approche très près de la tête du clou.

À partir de maintenant, considérez que le condensateur est chargé. Tenez une règle en acrylique à la main, son extrémité libre touchant le conducteur relié à la bande de feuille d'aluminium. Déplacez la tête de l'attache-papier vers la tête du clou. Lorsqu'elles sont très proches l'une de l'autre, une étincelle se produit et nous ne ressentons aucun choc, figure 12.5 (c).

Expérience 12.3 — Chargement d'un condensateur à l'aide d'un électrophore

L'expérience 12.1 peut être réalisée plus facilement en utilisant un électrophore pour charger le condensateur. Tout en tenant le cylindre par sa bande extérieure en feuille d'aluminium, touchez plusieurs fois la tête du clou avec le collecteur de charge électrisé d'un électrophore. Lorsque le système est bien chargé, on peut ressentir un

⁴[Fersdc, p. 73].

choc en touchant simultanément la bande de feuille d'aluminium et la tête du clou avec la même main.

Expérience 12.4 — *Chargement et déchargement d'une bouteille de Leyde*

Cette expérience montre comment obtenir des effets plus importants et plus intenses à l'aide d'une bouteille de Leyde composée d'une bouteille en plastique de 200 ou 300 ml. Utilisez un électrophore pour charger ce condensateur. Le collecteur de charge de cet électrophore sera un moule à pizza de 30 cm de diamètre muni d'une poignée isolante en son centre. Électrisez le collecteur de charge de l'électrophore. Il est représenté par le disque métallique électrisé à côté de la bouteille de Leyde dans la figure 12.6 (a). Ce collecteur de charge ne doit être manipulé que par sa poignée isolante. Tenez la bande externe de feuille d'aluminium à la main, en la mettant à la terre, comme indiqué sur la figure.

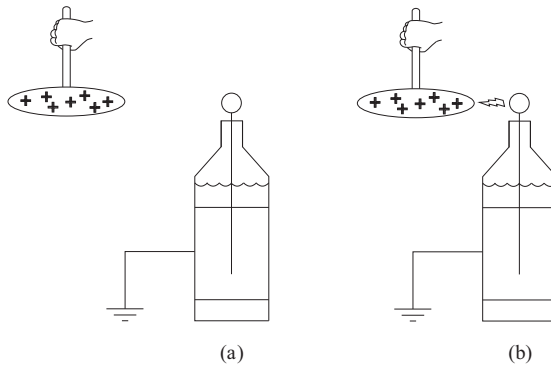


FIG. 12.6 : (a) Une bouteille de Leyde déchargée et mise à la terre. Un électrophore électrisé se trouve loin d'elle. (b) Vous pouvez charger le condensateur lorsque l'électrophore est placé très près de la tête de la vis.

Électrisez plusieurs fois la bouteille de Leyden à l'aide de ce collecteur de charge. Pour cela, il n'est pas nécessaire que le collecteur de charge soit en contact avec la tête arrondie de la vis dans la bouteille. Normalement, lorsqu'ils se rapprochent beaucoup l'un de l'autre, on entend un craquement suivi d'une étincelle, en particulier lorsqu'un bord du moule à pizza est approché de la tête de la vis, figure 12.6 (b). Cette procédure de charge doit être répétée 5 à 10 fois.

À partir de maintenant, supposons que le condensateur est bien chargé, avec une quantité suffisante d'électricité positive dans l'un de ses conducteurs. Il peut être mis à la terre ou isolé de la terre. Touchez avec un doigt la bande externe de feuille d'aluminium pour la mettre à la terre, figure 12.7 (a). Nous pouvons alors ressentir un bon choc en touchant simultanément d'un doigt la bande de feuille d'aluminium de la bouteille et d'un autre doigt la tête de sa vis. Parfois, ce dernier contact n'est pas nécessaire. Il suffit d'approcher un doigt très près de la tête de la vis pour ressentir le choc et voir l'étincelle, figure 12.7 (b).

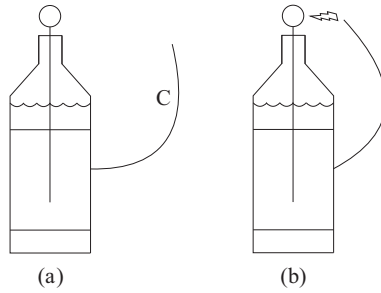


FIG. 12.7 : (a) Bouteille de Leyde chargée tenue dans la main par la feuille d'aluminium conductrice. (b) Lorsqu'un doigt est approché de la tête de la vis, une étincelle se produit, déchargeant le condensateur.

La figure 12.8 (a) montre comment obtenir une étincelle sans ressentir de décharge électrique. La bouteille de Leyde est initialement chargée. Prenez un fil de cuivre de 20 ou 30 cm de long. Enroulez une partie de celui-ci autour d'une règle en acrylique isolante. Enroulez une autre partie autour d'une autre règle en acrylique. Les extrémités libres du fil doivent dépasser des règles.

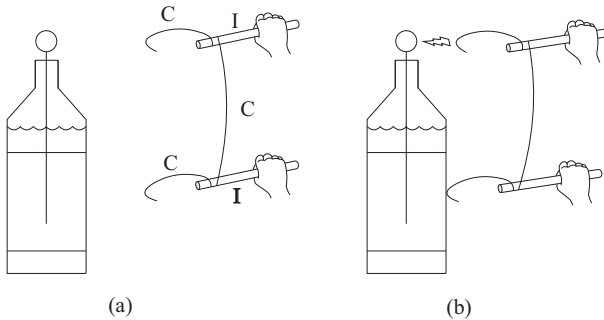


FIG. 12.8 : (a) Bouteille de Leyde chargée. Un seul fil de cuivre C enroulé autour de deux règles en acrylique I . (b) Décharge de la bouteille en connectant son conducteur externe à l'extrémité libre d'un fil de cuivre et en rapprochant l'autre extrémité du fil très près de la tête de la vis.

Tenez chaque règle dans une main. Touchez une extrémité libre du fil de cuivre dans la bande de feuille d'aluminium. Lorsque l'autre extrémité libre du fil est approchée de la tête de la vis, une étincelle et un bruit sec se produisent, figure 12.8 (b). Nous ne ressentons aucun choc pendant ce processus de décharge.

Expérience 12.5 — *Charge d'un condensateur cylindrique par sa bande conductrice latérale*

Les condensateurs des expériences 12.1 et 12.3 peuvent également être chargés en raclant la paille sur la bande d'aluminium collée à l'extérieur du cylindre. Afin

d'obtenir une électrisation suffisante, le condensateur doit être mis à la terre par son conducteur interne. Pour ce faire, touchez le clou avec un doigt, figure 12.9 (a). Pendant que le condensateur est mis à la terre, raclez une règle en acrylique frottée sur la bande de feuille d'aluminium externe du condensateur, figure 12.9 (b). Ce processus doit être répété environ 5 à 10 fois.

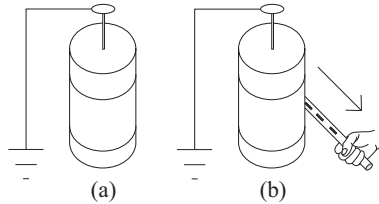


FIG. 12.9 : (a) Condensateur déchargé mis à la terre par son conducteur interne. (b) Chargez le condensateur pendant qu'il est mis à la terre, en raclant une règle acrylique sur sa bande externe en feuille d'aluminium.

À partir de maintenant, supposons que ce condensateur ait une charge électrique suffisamment importante. Touchez son conducteur interne avec un doigt, figure 12.10 (a). Lorsqu'un autre doigt s'approche de la bande d'aluminium, nous ressentons un choc et percevons parfois une étincelle, figure 12.10 (b).

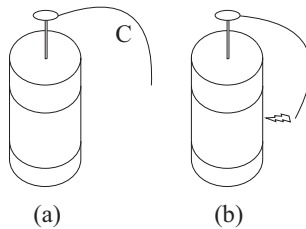


FIG. 12.10 : (a) Condensateur chargé avec un conducteur C touchant le clou. (b) Lorsque l'extrémité libre de ce conducteur est approchée de la bande de feuille d'aluminium, une étincelle se produit, nous ressentons un choc et le condensateur se décharge.

Le condensateur peut également être chargé via sa bande externe à l'aide d'un électrophore. Au départ, le condensateur doit être mis à la terre via son conducteur interne. Cette mise à la terre peut être réalisée en touchant la tête du clou avec un doigt. Une fois le condensateur mis à la terre, approchez le collecteur de charge d'un électrophore de la bande externe en feuille d'aluminium. Lorsque le bord du collecteur de charge électrisé est très proche de la bande externe, une étincelle se produit. Cette procédure de charge doit être répétée 5 à 10 fois.

Supposons que le condensateur ait été électrisé. Il peut alors être facilement déchargé lorsque la même main touche la tête du clou et la bande de feuille d'aluminium.

Expérience 12.6 — *Mise à la terre de l'un des deux conducteurs d'un condensateur chargé sans le décharger*

Chargez les condensateurs comme dans les expériences 12.1 et 12.3. À cette fin, les condensateurs doivent être mis à la terre pendant le processus de charge. Retirez la main de la bande externe de feuille d'aluminium. Le condensateur électrisé doit reposer sur une table. La partie inférieure des condensateurs utilisés dans cet ouvrage est en plastique, comme le montrent les figures 12.2 et 12.3 (b). Par conséquent, lorsque ces condensateurs chargés reposent sur une table, ils sont isolés du sol. Si une partie de la bande externe en feuille d'aluminium se trouve sur la face inférieure du cylindre, le condensateur doit reposer sur un isolant (comme une plaque de polystyrène) avant de procéder à cette expérience.

Lorsqu'un doigt touche la tête du clou ou de la vis de ce condensateur chargé et isolé, nous ne ressentons aucun choc. Il s'agit là d'une observation pertinente. Un condensateur chargé isolé du sol ne se décharge pas lorsqu'un doigt touche son conducteur interne. Autrement dit, il ne se décharge pas en mettant son conducteur interne à la terre.

Retirez votre doigt du clou ou de la vis. Nous pouvons maintenant toucher uniquement sa bande externe en feuille d'aluminium. Une fois de plus, nous ne ressentons aucun choc provenant de ce condensateur chargé. Il s'agit là d'une autre observation pertinente. Un condensateur chargé isolé du sol ne se décharge pas lorsqu'un doigt touche son conducteur externe. Autrement dit, il ne se décharge pas en mettant son conducteur externe à la terre.

Cependant, lorsque nous touchons simultanément la tête du clou et la bande de feuille d'aluminium, nous ressentons un choc.

Expérience 12.7 — *Comparaison des charges acquises par un condensateur mis à la terre et par un autre condensateur qui n'est pas mis à la terre*

Dans cette expérience, électrisez le condensateur sans le mettre à la terre pendant le processus de charge. Commencez avec une bouteille de Leyde déchargée posée sur une table. Électrisez-la à l'aide du collecteur de charge d'un électrophore. Supposons que ce collecteur de charge soit un disque conducteur muni d'une poignée isolante en son centre. Électrisez ce collecteur de charge et manipulez-le uniquement par sa poignée. Un bord de son disque électrisé est ensuite approché de la tête du clou ou de la vis du condensateur. Une étincelle peut être observée lorsqu'ils sont très proches l'un de l'autre.

Comparez l'étincelle produite dans cette expérience avec celle produite dans les expériences 12.3 et 12.4 dans lesquelles la bouteille était mise à la terre. La première observation que l'on peut faire est que l'étincelle et le bruit de claquement sont désormais plus faibles que ceux produits avec le bocal mis à la terre.

Rapprochez cinq fois le disque électrisé du collecteur de charge d'un électrophore de la tête du clou du condensateur isolé. Après ce processus de charge, déchargez-le en touchant simultanément la bande de feuille d'aluminium et la tête du clou, ce qui provoquera un choc lors de cette décharge. Cependant, ce choc est plus faible que celui produit en suivant la même procédure avec un condensateur mis à la terre. Supposons

qu'un condensateur soit initialement déchargé et mis à la terre par sa bande de feuille d'aluminium. Approchez cinq fois le disque électrisé du collecteur de charge d'un électrophore de la tête du clou de ce condensateur mis à la terre. Après ce processus de charge, déchargez-le en touchant simultanément la bande de feuille d'aluminium et la tête du clou, ce qui provoquera un choc important lors de cette décharge.

Répétez cette procédure de charge avec un condensateur isolé. C'est-à-dire, approchez cinq fois le disque électrisé du collecteur de charge d'un électrophore de la tête du clou du condensateur isolé. Mettez maintenant ce condensateur à la terre par son clou en touchant sa tête avec un doigt. Nous ne ressentons qu'un petit choc et le condensateur se décharge complètement.

Répétez une fois de plus cette procédure de charge avec un condensateur isolé. Placez le dos de votre main près de la bande de feuille d'aluminium de ce condensateur chargé et isolé. Parfois, nous sentons les poils de notre main être attirés par cette bande. Lorsque nous touchons la bande, nous ressentons un petit choc. Cependant, le pot n'est pas complètement déchargé par cette procédure de mise à la terre (la mise à la terre se fait ici par la bande externe de feuille d'aluminium). Afin de décharger complètement ce condensateur électrisé, nous devons toucher simultanément sa bande et la tête du clou, en ressentant un petit choc pendant cette décharge.

12.3 Mécanisme de fonctionnement du condensateur

Cette section décrit ces expériences en utilisant le fait qu'il existe un isolant entre les conducteurs du condensateur. Idéalement, cet isolant empêche l'échange de particules électrisées entre les conducteurs internes et externes d'une bouteille de Leyde.

Considérons la situation dans laquelle la bouteille est chargée alors que son conducteur externe est mis à la terre, c'est-à-dire lorsque nous tenons sa bande d'aluminium avec la main. Supposons que nous raclons une paille chargée positivement sur la tête de la vis. Nous pouvons également approcher un collecteur de charge chargé positivement de la tête de la vis, ce qui produit une étincelle lorsqu'ils sont très proches. Dans ces situations, le conducteur interne du condensateur devient chargé positivement. Comme la bande externe est mise à la terre, il y a un échange de particules électrisées avec la terre. Cette bande devient chargée négativement. Les charges positives du conducteur interne sont réparties essentiellement le long de la partie de sa surface qui est proche du conducteur externe. De même, les charges négatives du conducteur externe sont réparties essentiellement le long de la partie de sa surface qui est proche du conducteur interne.

La figure 12.11 illustre des condensateurs électrisés de plusieurs formes. Leurs conducteurs sont représentés par C_1 et C_2 , l'isolant intermédiaire par I .

La figure 12.11 (a) illustre un condensateur à plaques parallèles vu de profil, la figure 12.11 (b) montre un condensateur cylindrique, tandis que la figure 12.11 (c) représente une bouteille de Leyde. Nous exagérons l'épaisseur des bandes externes de feuille d'aluminium afin de souligner le fait que leurs charges sont essentiellement situées le long de leurs faces internes. Ces trois distributions de charge ne sont que

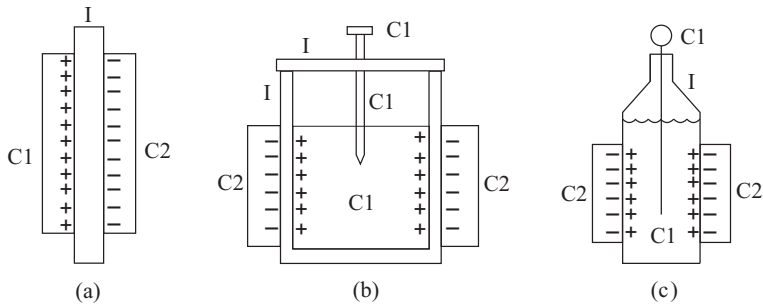


FIG. 12.11 : Condensateurs chargés. (a) Plaques parallèles. (b) Condensateur cylindrique. (c) Bouteille de Leyde.

qualitatives.

Lorsque nous relierons à la terre un seul des conducteurs d'une bouteille de Leyde chargée, en maintenant la bouteille isolée de la terre, celle-ci ne se décharge pas. Les charges opposées restent à leur place en raison de l'attraction entre les particules de signe différent.

En revanche, le condensateur se décharge lorsque les deux conducteurs C_1 et C_2 sont connectés à un troisième fil conducteur.

12.4 Gray, Du Fay et l'électrisation de l'eau

Stephen Gray (1666–1736) a découvert les conducteurs et les isolants en 1729, publiant ses conclusions en 1731 dans l'un des articles les plus importants de l'histoire de l'électricité.⁵ Le volume 1 de cet ouvrage présente une description détaillée des travaux de Gray.⁶ Il a décrit les substances isolantes suivantes dans ses expériences : un fil de soie, des lignes de pêche en crin de cheval, un bloc de résine, du verre chauffé, des blocs de cire d'abeille, de soufre et de laque. Son générateur électrique était simplement un tube en verre flint, c'est-à-dire un verre lourd et brillant contenant de l'oxyde de plomb. Il a frotté son tube à mains nues. Il a tenu le tube en verre frotté dans sa main pendant les expériences. Comme le tube ne s'est pas déchargé au contact de ses mains, cela signifie qu'il agissait comme un très bon isolant, contrairement à la plupart des verres modernes que l'on trouve à la maison. De plus, son tube de verre a acquis une grande densité de charge superficielle. Il a transmis la vertu attractive de ce tube électrisé à plusieurs conducteurs. Afin d'obtenir cet effet, le conducteur était isolé électriquement du sol, soutenu par des matériaux isolants ou suspendu par des cordes de soie. Lorsque son tube électrisé était approché d'une extrémité de ce conducteur isolé, il observait que l'autre extrémité du conducteur acquérait la propriété d'attirer les corps légers placés à proximité. Il a réussi ainsi à transmettre cette vertu attractive aux métaux, au bois, au corps humain et à de nombreuses autres substances conductrices. Il a transmis également cette vertu attractive à l'eau, nos mots

⁵[Gra32d], [Bos11, chapitre 6] et [BAC12, chapitre 7, pp. 127–169].

⁶Annexe B de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

entre crochets :^{7,8}

Le 23 mars [1730], j'ai dissous du savon dans l'eau de la Tamise, puis j'ai suspendu une pipe à tabac à une ligne faite de cheveux, de manière à ce qu'elle soit presque à l'horizontale, avec l'embouchure de la pipe vers le bas ; puis, après l'avoir trempée dans la solution savonneuse et avoir soufflé une bulle, la feuille de laiton posée sur un support en dessous, le tube [en verre] étant frotté, le laiton a été attiré par la bulle lorsque le tube a été tenu près du fil. J'ai ensuite répété l'expérience avec une autre bulle, en tenant le tube près de l'extrémité du tuyau, et l'attraction était alors beaucoup plus forte, la feuille de laiton étant attirée à une hauteur de près de deux pouces.

La figure 12.12 (a) illustre cette expérience. Elle montre que l'eau savonneuse se comporte comme un conducteur. La figure 12.12 (b) présente la distribution qualitative des charges dans l'expérience de Gray.

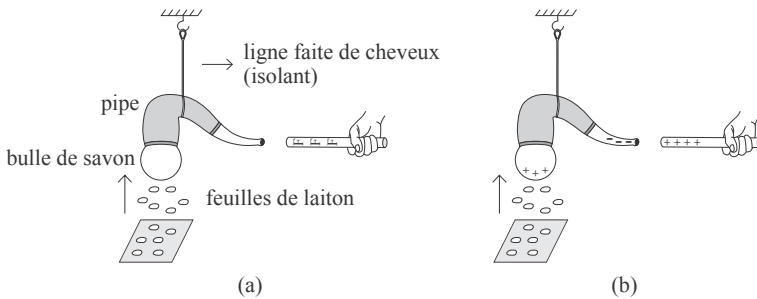


FIG. 12.12 : (a) Une bulle isolée attirant de petits morceaux de laiton lorsque l'on approche un tube de verre frotté de l'extrémité la plus étroite du tuyau. (b) Répartition qualitative des charges sur le tube, le tuyau et la bulle.

Gray avait réussi à transmettre la vertu d'attraction à plusieurs types de conducteurs, les rendant capables d'attirer les corps légers placés à proximité. Les isolants, en revanche, ne pouvaient pas attirer les corps légers avec la même force lorsque le tube de verre frotté était approché d'eux. Supposons deux corps de même forme et de même taille, un conducteur et un isolant, tous deux isolés du sol et éloignés l'un de l'autre. Approchez un tube de verre frotté du conducteur, en le polarisant. Approchez le tube de verre frotté à la même distance de l'isolant, en le polarisant. La polarisation observée acquise par le conducteur est beaucoup plus importante que la polarisation effective acquise par l'isolant.⁹

⁷[Gra32d, pp. 38–39], [Bos11, pp. 165–166] et [BAC12, pp. 162–163].

⁸March the 23d [1730], I dissolved Soap in the *Thames*-Water, then I suspended a Tobacco-Pipe by a Hair-Line, so as that it hung nearly horizontal, with the Mouth of the Bowl downwards; then having dipped it in the Soap-Liquor, and blown a Bubble, the Leaf-Brass laid on a Stand under it, the [glass] Tube being rubbed, the Brass was attracted by the Bubble, when the Tube was held near the Hair-Line. Then I repeated the Experiment with another Bubble, holding the Tube near the little End of the Pipe, and the Attraction was now much greater, the Leaf-Brass being attracted to the Hight of near two Inches.

⁹Voir les sections 7.3, 7.6, 7.7, 7.9 et 8.3 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

Nous présentons ici l'interprétation moderne de l'expérience de Gray. Le tuyau et la bulle se comportaient comme des conducteurs, tandis que le filament se comportait comme un isolant. Supposons que le tube de verre soit électrisé positivement. Lorsqu'il est approché de l'extrémité du tuyau, il se produit une polarisation des charges sur le système tuyau-bulle. La bulle éloignée devient électrisée positivement, tandis que l'extrémité du tuyau devient électrisée négativement. La bulle électrisée attire alors les petits morceaux de laiton conducteur placés en dessous.

En 1731, Gray a électrisé l'eau par un autre procédé. Il a fixé un bol de bois sur un support isolant en verre. Le bol était rempli d'eau douce. Un tube de verre frotté a été alors approché très près de la surface de l'eau, sans la toucher. Il a ensuite retiré le tube. En effectuant quelques tests, il a vérifié que l'eau avait été électrisée par ce procédé. Nous citons maintenant son ouvrage, nos commentaires figurant dans les notes de bas de page :^{10,11}

I. Dans le précédent compte rendu de mes expériences, j'ai décrit la manière de communiquer une attraction à une bulle d'eau savonneuse ; mais j'ai maintenant découvert que même *une masse d'eau reçoit une vertu attractive, ainsi qu'une vertu répulsive, en appliquant le tube excité à proximité, de la même manière que les corps solides.*¹² Pour réaliser cette expérience, j'ai fait tourner un bol en bois muni d'un trou de vis au fond, mais pas assez profond pour traverser le bois : celui-ci a été vissé à l'extrémité supérieure de l'un des supports que j'ai mentionnés dans les autres expériences, l'autre extrémité ayant été retirée. Le bol mesurait environ quatre pouces [10 cm] de diamètre et un pouce [2,5 cm] de profondeur. Le support a ensuite été placé sur un bloc de colophane, une plaque de verre ou le bord d'un verre à boire ou d'un verre cylindrique, comme ceux utilisés pour les verres à eau. Le verre doit d'abord être chauffé,¹³ puis le bol doit être rempli d'eau, le tube frotté et déplacé trois ou quatre fois sous le bol et au-dessus de l'eau, sans les toucher.¹⁴ Après avoir été excité, non seulement le bol, mais aussi l'eau de-

¹⁰[Gra32a, pp. 227–228], [Bos11, pp. 211–214] et [BAC12, chapitre 8, pp. 172–174], [DF33a, pp. 34–35] et [Hei99, p. 253].

¹¹I. In the former Account of my Experiments, I described the manner of communicating an Attraction to a Bubble of soaped Water ; but I have now found, that even a *Body of Water receives an Attractive Virtue, and also a Repelling one, by applying the excited Tube near it, after the same manner as solid Bodies do.* To perform this Experiment, I caused a wooden Dish to be turned, with a Screw-hole at the bottom, but no so far as to come through the Wood : This was screwed on the upper End of one of the Stands I have mentioned in the other Experiments, the other Top being taken off. The Dish was about four Inches Diameter, and one Inch deep. Then the Stand was set on a Cake of Rosin, or a Plate of Glass, or the Brims of a Drinking-Glass, or of a Cylindrick one, such as are used for Water Glasses. The Glass must be first warmed, then the Dish being filled with Water, the Tube rubbed, and moved both under the Dish and over the Water three or four times, without touching them. After it has been excited, not only the Dish, but the Water also, becomes Electrical ; and if a small Piece of Thread, or a narrow Slip of thin Paper, or a Piece of Sheer-Brass, commonly called Tinsel, be held over the Water in an horizontal Position, within about an Inch or some times more, any of the said Bodies will be attracted to the Surface of the Water, and be repelled, but not so often as by Solids. If a pendulous Thread be held at some Distance from the outside of the Dish, it will be attracted and repelled by it many times together with a very quick Motion, but not at so great a Distance as when the Dish is empty.

¹²Italiques dans l'original. Gray avait découvert qu'un conducteur solide pouvait acquérir des propriétés d'attraction et de répulsion lorsqu'un tube de verre frotté était approché de lui. Il découvrit alors que ces mêmes propriétés pouvaient être transmises à un corps d'eau.

¹³Grâce à cette procédure, le bol en bois était fixé sur un support isolant, à savoir un bloc de colophane ou un verre chauffé.

¹⁴La figure 12.13 illustre cette procédure.

viennent électriques;¹⁵ et si un petit morceau de fil,¹⁶ ou un mince morceau de papier fin, ou un morceau de laiton transparent, communément appelé clinquant, est tenu au-dessus de l'eau en position horizontale, à environ un pouce [2,5 cm] ou parfois plus, n'importe lequel desdits corps¹⁷ sera attiré vers la surface de l'eau, puis repoussé, mais pas aussi souvent que par des solides.¹⁸ Si un fil suspendu est maintenu à une certaine distance de l'extérieur du bol, il sera attiré et repoussé par celui-ci à plusieurs reprises avec un mouvement très rapide,¹⁹ mais pas à une distance aussi grande que lorsque le bol est vide.

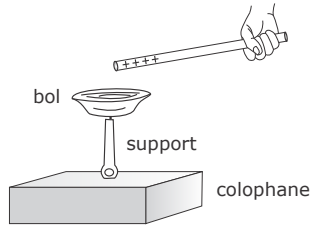


FIG. 12.13 : Bol d'eau fixé sur un support posé sur un bloc isolant en colophane. Le tube électrisé est déplacé sous et au-dessus du bol, sans toucher l'eau ni le bol.

Le support utilisé dans cette expérience était probablement en bois. Seuls le bloc de colophane et l'air ambiant étaient des isolants. Tous les autres corps étaient des

¹⁵La figure 12.14 illustre comment Gray a pu conclure que le bol d'eau s'était électrisé à la suite de cette procédure.

¹⁶Probablement un fil de coton ou de lin. Ces matériaux se comportent comme des conducteurs dans les expériences électrostatiques.

¹⁷Les corps mentionnés par Gray étaient un fil [de coton], un mince morceau de papier et un morceau de laiton pur. Tous ces matériaux se comportent comme des conducteurs.

¹⁸Comme Gray parle d'attraction et de répulsion, il a peut-être observé quelque chose d'analogue au mécanisme ACR. Si tel était le cas, alors l'une des extrémités du fil, du papier ou du clinquant était probablement fixée à une poignée isolante, tandis que leurs extrémités libres se trouvaient au-dessus de l'eau en position horizontale.

¹⁹Gray n'a pas précisé le matériau de son « fil pendulaire ». Nous pensons qu'il était similaire au pendule électrique qu'il a décrit en 1720 [Gra21, p. 107]. Autrement dit, un bâton en bois était muni d'un fil de soie fixé à son extrémité. Une plume était attachée à l'extrémité libre de ce fil. Le bâton était tenu à mains nues. Bien que le bâton en bois se comporte comme un conducteur dans cette expérience, cet aspect n'est pas crucial. Les principales propriétés de ce pendule sont les suivantes : le fil de soie se comporte comme un isolant, tandis que la plume se comporte comme un conducteur.

Obtenez une séquence d'attractions et de répulsions avec ce pendule électrique. À cette fin, la plume doit être placée entre une paille frottée et un conducteur mis à la terre, comme décrit dans l'expérience 4.15 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17]. Dans l'expérience spécifique de Gray, la plume de son pendule électrique était maintenue, par le fil de soie auquel elle était attachée, à la même hauteur que le bol d'eau électrisé. La plume doit être placée entre ce bol électrisé et un corps mis à la terre. Supposons que ce corps mis à la terre était l'une des mains de Gray. Lorsque le pendule a été placé près du récipient électrisé, la plume a été attirée par le récipient, l'a touché et a acquis une charge nette du même signe que celle du récipient. Après leur contact, la plume a été repoussée par le récipient. Elle a alors touché le doigt de Gray du côté opposé. La plume a été déchargée par ce processus de mise à la terre. Elle pouvait alors être à nouveau attirée par le bol électrisé, le toucher, puis être déchargée par le doigt. Ce processus pouvait se répéter plusieurs fois, produisant un mouvement vibratoire d'attraction et de répulsion. En principe, il pouvait se produire plusieurs fois, jusqu'à ce que le bol d'eau soit complètement déchargé. La figure 12.14 illustre ce mécanisme ACR.

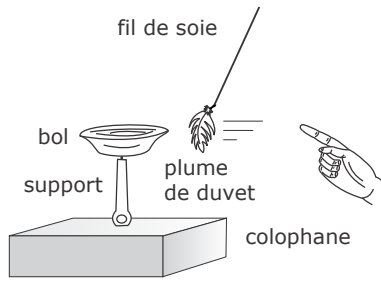


FIG. 12.14 : Une fois le bol électrisé, une plume conductrice attachée à un fil isolant est placée entre la plaque et un doigt. La plume est attirée par la plaque, la touche, puis est repoussée. Elle est électrisée pendant le contact avec le bol et se décharge lorsqu'elle touche le doigt. Ce mécanisme ACR peut être répété plusieurs fois.

conducteurs, à savoir l'eau, la plaque et le support. Il est donc possible que le tube de verre ait électrisé non seulement l'eau, mais aussi tous les conducteurs en contact avec l'eau. L'électrisation a probablement été obtenue par des étincelles ou de petites décharges électriques entre le tube de verre électrisé et l'eau. En supposant que ce processus d'électrisation ait eu lieu, alors la plaque et l'eau ont été électrisées avec une charge du même signe que celle du tube en verre. Dans l'expérience précédente, il y avait une polarisation du système tube-bulle. Dans la présente expérience, en revanche, le système de conducteurs a reçu une charge nette différente de zéro. La figure 12.15 illustre comment Gray a pu conclure que l'eau était électrisée.

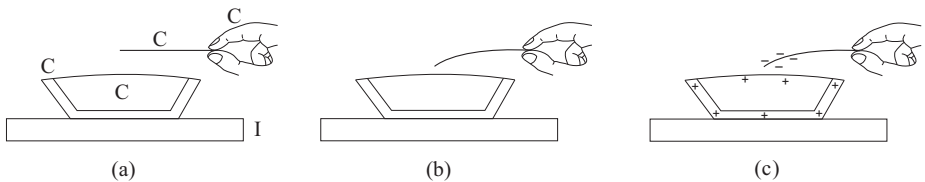


FIG. 12.15 : (a) Les conducteurs sont représentés par la lettre *C*, tandis que l'isolant est représenté par *I*. Eau neutre, aucune attraction. (b) Eau électrisée attirant une bande conductrice placée à proximité. (c) Répartition des charges dans cette expérience.

La plaque d'eau est soutenue par un matériau isolant *I*. La figure 12.15 (a) montre la situation lorsque le système n'est pas électrisé. Dans ce cas, une bande de papier horizontale peut être approchée de la plaque sans être attirée. Le tube de verre électrisé est ensuite déplacé au-dessus et en dessous de la plaque d'eau, très près du système mais sans le toucher. Retirez le tube de verre. La figure 12.15 (b) montre ce qui se passe lorsqu'une bande de papier horizontale est approchée du système. Elle est attirée par l'eau électrisée. La figure 12.15 (c) présente la distribution qualitative des charges dans cette expérience.

En 1733, Du Fay poursuivit les recherches de Gray. Il conclut que la plupart des corps initialement neutres pouvaient être électrisés par ce processus. Il suffisait de les

mettre en contact, ou très près, d'un autre corps électrisé.²⁰ Afin d'électriser le corps initialement neutre, celui-ci doit être isolé du sol. Un exemple de ce processus d'électrisation se produit dans le mécanisme *ACR* décrit dans la section 4.4, figure 4.11.²¹ Dans ce processus, la charge acquise par le corps initialement neutre a le même signe que la charge de l'isolant électrisé qui entre en contact avec lui. La « règle de Du Fay » établissait que le corps à électriser par ce processus devait être correctement isolé, c'est-à-dire qu'il devait reposer sur un support isolant d'épaisseur suffisante. Il décrivait ce processus d'électrisation comme suit, nos commentaires figurant entre crochets et dans la note de bas de page :²²

Nous avons vû dans la première partie de ce Mémoire,²³ que les liqueurs pouvoient devenir électriques ; la seule manière d'y réussir par l'approche du tuyau [électrisé], est de les mettre dans un petit vase de verre, de porcelaine ou de fayence, & de poser ce vase sur un guéridon de verre ou de cire d'Espagne, car on le tenteroit en vain sur un de bois ou de métal ; [...]

Le support en cire ou en verre agissait ici comme isolant.

Une fois cette précaution prise, la plupart des corps pouvaient être électrisés soit par contact, soit par approche rapprochée d'un isolant électrisé. En suivant cette procédure, Du Fay a réussi à électriser l'eau, comme Gray l'avait fait avant lui. Tout d'abord, un récipient rempli d'eau était posé sur un matériau isolant. Il pouvait ensuite être électrisé lorsqu'un tube chargé était déplacé au-dessus et en dessous du récipient.

Du Fay a également réussi à électriser l'eau par contact. À cette fin, un récipient rempli d'eau était posé sur un matériau isolant. Un fil conducteur était fixé sur un tube en verre. Il électrisait le tube en le frottant contre un matériau approprié. Grâce à cette électrisation du tube, le fil qui y était relié était polarisé. L'extrémité libre du fil était ensuite mise en contact avec l'eau isolée. Après avoir retiré le fil, plusieurs tests lui ont démontré que l'eau était devenue électrisée. Voici sa description de cette expérience, avec nos commentaires entre crochets et en note de bas de page :²⁴

Dans un autre endroit des *Transactions Philosophiques* de l'année dernière, N° 422,²⁵ M. Gray fait voir que l'Eau peut devenir électrique. Voici de quelle manière se fait cette expérience. On remplit d'eau une petite écuelle de bois ou une soucoupe de porcelaine, on la pose sur un de ces petits guéridons, ou sur un verre à boire bien sec, & un peu chauffé ; pour lors ayant frotté ce tube, on l'approche de la soucoupe, le passant par dessus & par les côtés deux ou trois fois, sans néanmoins y toucher, cela suffit pour communiquer une vertu électrique [c'est-à-dire la propriété d'attirer les corps légers] très-sensible à l'écuelle, ou la soucoupe, & à l'eau qui y est contenuë, ce [cette électrisation] que l'on reconnoît en approchant un [seul] cheveu, ou un fil délié dans une situation horisontale de la surface de l'eau, on voit alors ce fil s'en approcher jusqu'à ce qu'il s'y soit plongé. Cette expérience m'a réussi de la manière que je viens de la décrire, & avec autant de facilité, de

²⁰ [DF33a], [DF33c] et [Hei99, pp. 252–253].

²¹ Section 4.8 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

²² [DF33c, p. 84] et [Hei99, pp. 252–253].

²³ Voir [DF33a, pp. 33–34].

²⁴ [DF33a, pp. 34–35] et [Hei99, p. 253].

²⁵ Voir [Gra32a].

la manière suivante. J'avois ajusté au bout de mon tuyau [en verre] un bouchon de liège auquel étoit attaché un bout de corde, le tuyau étant rendu électrique par le frottement, j'ai plongé l'extrémité de la corde dans la soucoupe remplie d'eau, & posée sur un verre chauffé, ce qui a communiqué la vertu [électrique] à la surface de l'eau, de même que par l'opération précédente, & il est vraisemblable qu'il [l'électrisation] en seroit de même de toutes les liqueurs, mais il est à observer que cette vertu [électrique] est moins considérable dans l'eau que dans les corps solides.

La figure 12.16 illustre la procédure mise au point par Du Fay pour électriser l'eau. Son tube de verre électrisé servait d'isolant I . Le bol d'eau était soutenu par un autre isolant I . L'eau, le bol et la ficelle reliée au tube se comportaient comme des conducteurs C dans cette expérience.

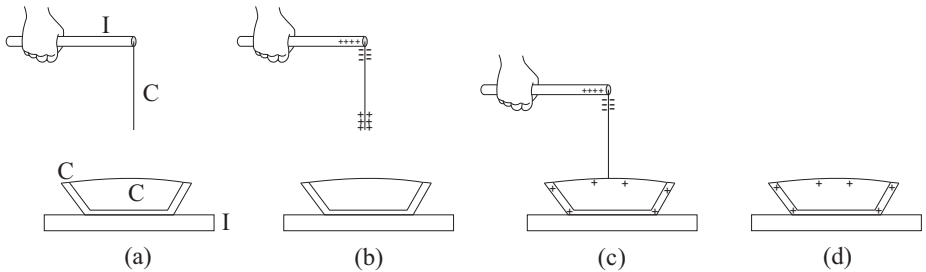


FIG. 12.16 : (a) Tube en verre isolant I avec une ficelle conductrice C attachée à son extrémité. Bol rempli d'eau conductrice C et posé sur un matériau isolant I . (b) Le frottement du tube en verre polarise la ficelle. (c) L'extrémité libre de la ficelle est immergée dans l'eau. Les charges qui se trouvaient à l'extrémité de la ficelle se répandent dans le système, électrisant l'eau. (d) Retirez le tube avec la ficelle. L'eau reste électrisée.

Supposons maintenant que l'eau se trouve dans un bol conducteur posé sur un autre conducteur (comme une plaque de bois ou de métal reliée à la terre). Dans ce cas, il ne serait pas possible d'électriser l'eau selon la méthode de Gray (c'est-à-dire en déplaçant un tube en verre électrisé sous et au-dessus du récipient), ni selon la méthode de Du Fay (c'est-à-dire en touchant l'eau avec l'extrémité libre d'un fil conducteur relié au tube en verre électrisé), comme illustré dans la figure 12.17.

Le tube de verre frotté polarise le fil conducteur qui y est relié, figure 12.17 (b). Lorsque l'extrémité libre du fil polarisé touche l'eau mise à la terre, les charges inférieures du fil sont neutralisées par les charges libres présentes sur la Terre, figure 12.17 (c). Une fois le tube retiré avec le fil, l'eau n'est plus électrisée, figure 12.17 (d).

12.5 Les premiers condensateurs

Cette section décrit l'invention du condensateur. Il a été découvert par hasard en 1745 en Allemagne et aux Pays-Bas, et est généralement appelé « bouteille de

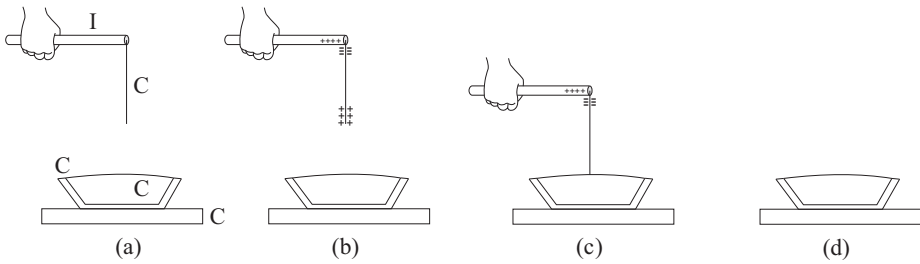


FIG. 12.17 : (a) Tube en verre I avec une ficelle C à son extrémité. Bol rempli d'eau posé sur un support conducteur. Les conducteurs sont représentés par C et les isolants par I . (b) Tube en verre frotté avec une ficelle polarisée. (c) Ficelle touchant l'eau mise à la terre. La Terre neutralise les charges à l'extrémité libre de la ficelle. (d) Retirez le tube avec sa ficelle. L'eau n'est pas électrisée par cette procédure.

Leyde » (ou « fiole de Leyde »).²⁶ À l'époque, personne ne savait comment il fonctionnait, pas même les scientifiques qui s'intéressaient spécifiquement à l'électricité. Il enfreignait la règle de Du Fay décrite dans la section 12.4. Les personnes qui ont découvert cet instrument travaillaient avec un générateur électrostatique. Il s'agissait généralement d'un globe ou d'un cylindre en verre tournant autour d'un axe fixe à l'aide d'une manivelle. Le verre en rotation était frotté contre la main d'une personne ou contre une autre substance (coussin, morceau de tissu en coton ou cuir). Guericke avait publié en 1672 quelques expériences, notamment celle d'une plume flottant au-dessus d'un globe en soufre frotté. Francis Hauksbee a construit à dessein vers 1708 les premiers générateurs électriques.²⁷ Georg Matthias Bose (1710–1761) a introduit vers 1740 une amélioration de ces générateurs, appelée « conducteur principal ». Il s'agissait essentiellement d'un conducteur isolé du sol. Il pouvait s'agir d'une épée, d'une barre de fer ou d'un canon. Une extrémité du conducteur principal était en contact ou très proche du verre tournant. Cette extrémité pouvait également être en contact ou très proche du coussin, du tissu en coton ou du cuir qui était frotté contre le verre tournant. Le conducteur principal accumulait les charges générées par le verre frotté. De cette manière, il était plus facile de réaliser plusieurs expériences de conduction ou de décharges à travers l'extrémité libre du conducteur principal.²⁸ Il pouvait être isolé du sol en reposant sur des supports isolants ou en étant suspendu par des cordes isolantes.

Le premier condensateur a été construit en Allemagne par Ewald Jürgen von Kleist (1700–1748) en 1745. Il disposait d'une machine électrostatique à laquelle était relié un conducteur principal. Un récipient rempli d'eau situé à proximité était isolé du sol. L'eau était ensuite mise en contact avec le conducteur principal via un fil métallique plongé dans le liquide. En faisant fonctionner la machine, il a pu produire des étincelles à partir de son système. Il a ensuite remplacé le récipient rempli d'eau par une bobine en bois isolée. En plaçant un clou sur la bobine et en faisant fonctionner la machine, il

²⁶ [Whi73a, p. 45], [Hei99, Chapter XIII : The invention of the condenser] et [JG17].

²⁷ Section 4.11 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

²⁸ [Hei66] et [Hei99, pp. 264–265].

a pu produire des étincelles alternativement à partir du clou et de la bobine. Bien que ce système ait été connecté au conducteur principal, il était isolé du sol.

Vient ensuite sa description du condensateur. Un clou a été introduit dans une petite bouteille en verre isolée du sol. Il était relié à la machine par un conducteur. La machine a été mise en marche et le système électrisé. Il a ensuite tenu la bouteille en verre dans sa main. Autrement dit, il a mis le système à la terre. En la retirant de la machine, des effets électriques ont été produits avec une puissance plus importante et une durée plus longue que les effets produits avec la bouteille en verre isolée. Cette procédure fortuite a donné naissance au premier condensateur :^{29,30}

Si l'on introduit un clou, un fil métallique solide, etc., dans un petit flacon à col étroit et que l'on applique une décharge électrique, on obtient des effets particulièrement puissants. Le verre doit être très sec et chaud. Tout fonctionne mieux si l'on place un peu de mercure ou d'alcool à l'intérieur. La flamme apparaît sur le petit flacon dès qu'il est retiré de la machine, et j'ai pu faire plus de soixante pas dans la pièce à la lumière de ce petit instrument enflammé.

La figure 12.18 (a) illustre cette expérience.

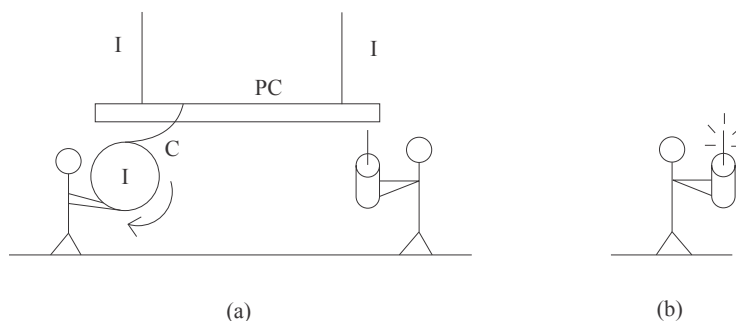


FIG. 12.18 : (a) Électrisation de la bouteille en verre à l'aide d'un clou. (b) Le système brille tandis que la personne se promène dans la pièce avec la bouteille dans les mains.

Le générateur électrostatique est représenté par un globe en verre isolant tournant autour de son axe. Il peut être électrisé par friction lorsque les mains le touchent. Le conducteur principal PC est relié au globe par un fil conducteur C , suspendu par des câbles isolants I . Le conducteur principal est électrisé par le fil conducteur qui touche le globe frotté. Il est également électrisé lorsqu'une extrémité du fil conducteur reste très proche du globe frotté. Une personne tient une petite bouteille en verre avec un clou. Lorsque la pointe du clou touche le conducteur principal ou reste très proche de celui-ci, la bouteille s'électrise. Lorsque la personne retire la bouteille et se déplace dans la pièce, le clou brille par effet corona (décharges électriques dans

²⁹ [Hei99, p. 310].

³⁰ If a nail, a strong wire, etc., is introduced into a narrow-necked little medicine bottle and electrified, especially powerful effects follow. The glass must be very dry and warm. Everything works better if a little mercury or alcohol is placed inside. The flare appears on the little bottle as soon as it is removed from the machine, and I have been able to take over sixty paces around the room by the light of this little burning instrument.

l'air), figure 12.18 (b). La bouteille en verre peut également être électrisée si le clou touche directement le globe en rotation (ou lorsque sa pointe s'en approche de très près) pendant que la personne tient la bouteille dans ses mains.

Sa description se poursuit comme suit :^{31,32}

Si j'électrise fortement le clou, de sorte que la lumière à l'intérieur du verre et les étincelles soit visible, je peux l'emporter dans une autre pièce et enflammer de l'alcool ou de la térébenthine.

Il était lui-même curieux de connaître le mécanisme de fonctionnement de son instrument :^{33,34}

Ce qui me surprend vraiment dans tout cela, c'est que cet effet puissant ne se produit que dans la main. Aucun esprit ne peut être allumé si l'instrument repose sur la table. Peu importe la force avec laquelle j'électrise la fiole, si je la pose sur la table et que j'approche mon doigt, il n'y a pas d'étincelle, seulement un sifflement ardent. Si je la saisis à nouveau, sans la réélectriser, elle retrouve sa puissance initiale.

Selon la règle de Du Fay mentionnée dans la section 12.4, le système aurait dû se décharger lorsqu'il a été mis à la terre par les mains de la personne qui le tenait tout en se déplaçant dans la pièce. Cependant, cette décharge n'a pas eu lieu. Ce qui s'est produit était tout à fait le contraire, à savoir que les effets électriques étaient plus forts avec la bouteille en verre mise à la terre qu'avec la bouteille isolée.

Une découverte analogue a été faite indépendamment aux Pays-Bas, également en 1745. Le professeur de physique expérimentale de la ville de Leyde (Leiden), Musschenbroek (1692–1761), voulait produire des étincelles à partir d'eau électrisée. Il disposait d'un récipient rempli d'eau posé sur un support isolant. Un fil conducteur reliant l'eau au conducteur principal d'un générateur électrique. En faisant fonctionner la machine, il électrisait le conducteur principal et l'eau qui y était reliée. Un doigt approchant le conducteur principal produisait des étincelles. L'avocat Cunnaeus connaissait ces expériences car il avait l'habitude de se rendre au laboratoire de Musschenbroek. Lorsqu'il a essayé de reproduire cette expérience chez lui, il a par inadvertance tenu le récipient d'eau dans ses mains, au lieu de le placer sur un support isolant. Lorsqu'il a essayé de produire des étincelles en approchant son doigt du conducteur principal ou du fil conducteur relié à l'eau, il a reçu un choc électrique très violent. Il a rapporté sa découverte à Musschenbroek et à son assistant Allamand. En répétant cette procédure, ils ont également reçu un choc électrique très violent. Le récit le plus célèbre de cette expérience a été présenté par Musschenbroek dans une lettre adressée à Réamur (1683–1757) écrite en janvier 1746 et traduite en français dans les *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* :³⁵

³¹[Hei99, pp. 310–311].

³²If I electrify the nail strongly, so that the light within the glass and the sparks are visible, I can take it into another room and ignite spirit of wine or of terpenite.

³³[Hei99, p. 311].

³⁴What really surprises me in all this, is that the powerful effect occurs only in the hand. No spirit can be ignited if it [the instrument] rests on the table. No matter how strongly I electrify the phial, if I set it on the table and approach my finger to it, there is no spark, only a fiery hissing. If I grasp it again, without electrifying it anew, it displays its former strength.

³⁵[Nol46, pp. 2–3], [Hei99, pp. 313–314].

Je veux vous communiquer une expérience nouvelle, mais terrible, que je vous conseille de ne point tenter vous-même Je faisois quelques recherches sur la force de l'électricité (c'est toujours M. Musschenbroek qui parle) pour cet effet j'avois suspendu à deux fils de soie bleue un canon de fer, *AB, Fig. I*, qui recevoit par communication l'électricité d'un globe de verre, que l'on faisoit tourner rapidement sur son axe, pendant qu'on le frottoit en y appliquant les mains; à l'autre extrémité *B* pendoit librement un fil de laiton, dont le bout étoit plongé dans un vase de verre *D* rond, en partie plein d'eau, que je tenois dans ma main droite *F*, & avec l'autre main *E*, j'essayois de tirer des étincelles du canon de fer électrisé : tout d'un coup ma main droite *F* fut frappée avec tant de violence, que j'eus tout le corps ébranlé comme d'un coup de foudre; le vaisseau, quoique fait d'un verre mince, ne se casse point ordinairement, & la main n'est point déplacée par cette commotion; mais le bras & tout le corps sont affectés d'une manière terrible que je ne puis exprimer : en un mot, je croyois que c'étoit fait de moi. Mais voici des choses bien singulières (ajoute l'Auteur de la lettre) quand on fait cette expérience avec un verre d'Angleterre, l'effest est nul, ou presque nul; il faut que le verre soit d'Allemagne, il ne suffiroit pas même qu'il fût de Hollande; il est égal qu'il soit arrondi en forme de sphère ou de toute autre figure : on peut employer un gobelet ordinaire, grand ou petit, épais ou mince, profond ou non; mais ce qui est absolument nécessaire, c'est que ce soit du verre d'Allemagne ou de Bohême; celui qui m'a pensé donner la mort, étoit d'un verre blanc & mince, & de cinq pouces [12,5 cm] de diamètre. La personne qui fait l'expérience peut être placée simplement sur le plancher, mais il faut que ce soit la même qui tienne d'une main le vase *D*, & qui, de l'autre main, excite l'étincelle; l'effet est bien peu considérable, si cela se fait par deux personnes séparées; si l'on place le vase *D* sur un support de métal porté sur une table de bois, en touchant ce métal seulement du bout du doigt, & tirant l'étincelle avec l'autre main, on ressent encore un très-grand coup, &c.

La première illustration de cette expérience a été présentée par Nollet en 1750, figure 12.19.³⁶

Musschenbroek était un grand scientifique spécialisé dans l'électricité. Malgré cela, il fut totalement surpris par le résultat de cette expérience. Il ne parvint pas à expliquer le mécanisme de fonctionnement de cet instrument, bien qu'il ait clairement précisé tous les aspects principaux permettant de le faire fonctionner avec une telle puissance.

Bien qu'il ait déclaré qu'il ne répéterait pas l'expérience, sa propre description indique que certaines variations ont été essayées en modifiant le type, l'épaisseur et le format du verre. Il est probable que le verre allemand qu'il utilisa lorsqu'il reçut la décharge électrique se comporta comme un bon isolant, permettant l'accumulation de charges opposées de part et d'autre (c'est-à-dire à l'intérieur et à l'extérieur de la bouteille). Les verres anglais et néerlandais, en revanche, se comportèrent probablement comme des conducteurs pour les expériences électrostatiques. Si tel était le cas, ils n'auraient pas permis l'accumulation de charges opposées à l'intérieur et à l'extérieur du verre.

L'expérience de Cunaeus est aussi représentée dans la figure 12.20.³⁷

³⁶[Hei99, p. 285].

³⁷[Des76, partie 3, p. 570, figure 382].

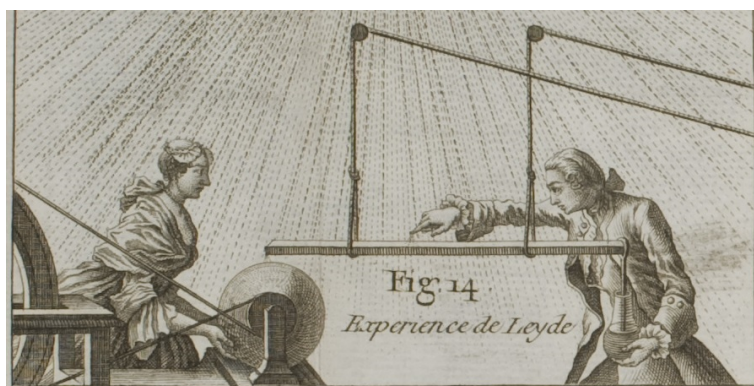


FIG. 12.19 : Première représentation de l'expérience de la bouteille de Leyde. La barre horizontale représente le tube de fer AB décrit par Musschenbroek, suspendu à des fils de soie isolants, tandis que la bouteille tenue dans la main de l'expérimentateur représente son globe de verre D .

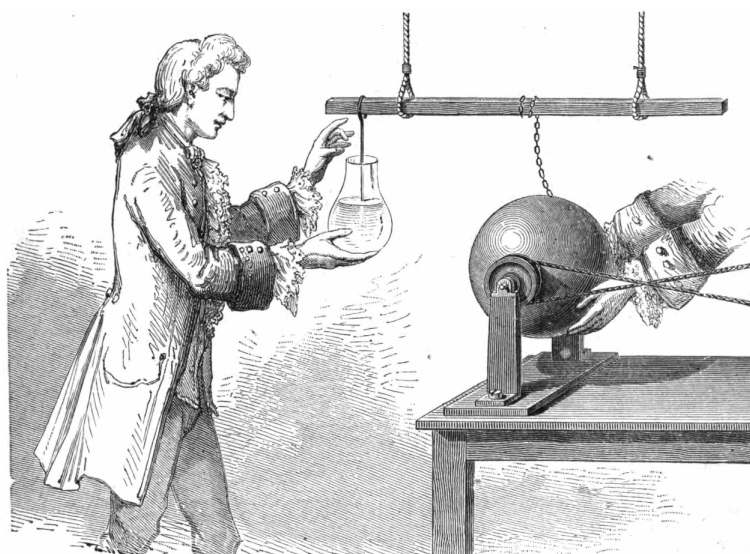


FIG. 12.20 : Une autre représentation de l'expérience de la bouteille de Leyde.

Les figures 12.19 et 12.20 illustrent un globe en verre tournant autour de son axe. Il est électrisé lorsqu'il est frotté par les mains qui le touchent. Une barre métallique horizontale est suspendue par des cordes isolantes. Dans la figure 12.19, la barre est électrisée par des étincelles dans l'air, car son extrémité est très proche du globe en rotation. Dans la figure 12.20, en revanche, elle est électrisée par la chaîne métallique qui la touche, tandis que l'autre extrémité de la chaîne touche le globe en rotation. À l'extrémité de cette barre se trouve un fil métallique plongé dans l'eau contenue dans

un bocal en verre. Une personne tient le bocal dans sa main. Elle essaie de produire une étincelle avec son autre main en s'approchant de la barre ou du fil métallique. À ce moment, elle ressent un choc immense.

Benjamin Franklin a fourni le mécanisme de fonctionnement du bocal de Leyde.³⁸ L'aspect principal de son explication est que le bocal en verre se comportait comme un isolant. L'eau à l'intérieur du bocal se comportait comme un conducteur qui était en contact avec sa paroi intérieure. La main de la personne tenant la bouteille agissait comme un autre conducteur en contact avec la paroi externe de la bouteille. La personne tenant la bouteille agissait comme une mise à la terre de sa paroi externe. L'eau était en contact avec le conducteur principal par le biais du fil métallique. En faisant fonctionner le générateur, celui-ci électrise le globe en rotation, le conducteur principal, le fil métallique et l'eau. Tous ces conducteurs acquièrent une charge électrique du même signe que la charge répartie à la surface du globe frotté. La surface externe du bocal est mise à la terre par la main de la personne qui le tient. En faisant fonctionner le générateur, la main de la personne qui tient le bocal s'électrise avec une charge de signe opposé à celui du globe en rotation. Lorsque le bocal est retiré du générateur, tout en le tenant dans la main, on obtient un condensateur électrisé, avec des charges égales et opposées réparties sur les surfaces des conducteurs en contact avec les parois internes et externes du bocal en verre. Franklin a écrit ce qui suit dans une lettre de 1747 à son ami Collinson :^{39,40}

En même temps que le fil et le haut de la bouteille, etc., sont électrisés *positivement* ou *plus*, le fond de la bouteille est électrisé *négativement* ou *moins*, dans une proportion exacte; c'est-à-dire que quelle que soit la quantité d'électricité projetée dans la partie supérieure, une quantité égale sort par le fond.[†]

† Ce qui est dit ici, et par la suite, à propos du *haut* et du *bas* de la bouteille est vrai pour les surfaces *intérieures* et *extérieures*, et aurait dû être exprimé ainsi.⁴¹

Lors de la décharge du bocal, il doit y avoir un chemin permettant au feu électrique de se propager entre le revêtement conducteur extérieur et le revêtement conducteur intérieur. Ce chemin ne passait pas par le verre isolant. Franklin a souligné que ce chemin passait par un conducteur touchant le haut et le bas de la bouteille (ou ses revêtements intérieur et extérieur) :^{42,43}

3. L'équilibre ne peut être rétabli dans la bouteille par une communication ou un contact *vers l'intérieur* des parties; mais cela doit être fait par une communi-

³⁸ [Hei99, pp. 330–334].

³⁹ [Fra69, p. 13], [Fra04, volume 2], [Hei99, p. 331] et [Mor04b, Version 1.3, section III, p. 4].

⁴⁰ At the same time that the wire and the top of the bottle, &c., is electrised *positively* or *plus*, the bottom of the bottle is electrised *negatively* or *minus*, in exact proportion; *i.e.*, whatever quantity of electrical fire is thrown in at the top, an equal quantity goes out of the bottom.[†]

† What is said here, and after, of the *top* and *bottom* of the bottle is true of the *inside* and *outside* surfaces, and should have been so expressed.

⁴¹ Note ajoutée par Franklin dans une édition ultérieure de son livre.

⁴² [Fra69, pp. 13–14], [Fra04, volume 2] et [Mor04b, version 1.3, section III, p. 5].

⁴³ 3. The equilibrium cannot be restored in the bottle by *inward* communication or contact of the parts; but it must be done by a communication form'd *without* the bottle between the top and bottom, by some non-electric [that is, by some conductor], touching or approaching both at the same time; in which case it is restored with a violence and quickness inexpressible; or, touching each alternately, in which case the equilibrium is restored by degrees.

tion formée à l'extérieur de la bouteille entre le haut et le bas, par un élément non électrique [c'est-à-dire par un conducteur], touchant ou s'approchant des deux en même temps; auquel cas il est rétabli avec une violence et une rapidité inexpriables; ou en touchant chacune alternativement, auquel cas l'équilibre est rétabli progressivement.

Supposons que la personne tienne le bocal électrisé dans sa main. Lorsqu'elle touche de l'autre main un conducteur en contact avec l'eau, elle ressentira un choc immense. Ce choc sera dû au passage soudain d'un courant électrique à travers son corps conducteur. Il y aura une neutralisation des charges opposées situées à l'intérieur et à l'extérieur du bocal, qui étaient séparées par le verre isolant et l'air ambiant.

Vous pouvez vous faire une idée du choc ressenti par Cunnaeus ou Musschenbroek en utilisant l'électrophore et le pot de Leyde décrits dans les sections 6.1 et 12.1. À cette fin, utilisez un moule à pizza de 30 cm de diamètre avec une poignée isolante au centre, figure 2.15 (d). La base isolante de cet électrophore peut être une plaque carrée en PVC de 40 cm de côté. Elle s'électrise lorsqu'on la frotte vigoureusement avec une serviette en papier ou un mouchoir en coton. Le pot de Leyde peut être une bouteille en plastique de 200 ou 300 ml, figure 12.2. Les mécanismes de charge et de décharge de la bouteille de Leyde ont été décrits dans l'expérience 12.4.

Les expériences de Gray et Du Fay décrites dans la section 12.4, ainsi que celles sur la bouteille de Leyde décrites dans cette section, montrent que l'eau peut stocker ou accumuler de l'électricité. Cette propriété conductrice de l'eau a été utilisée dans le générateur électrostatique de Kelvin.⁴⁴ Des expériences utilisant ce fait continuent d'être menées aujourd'hui.⁴⁵

⁴⁴Section 7.12 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

⁴⁵[APZ06], [OP09], [San11], [Pol13, chapitre 5] et [GB17, chapitre 6].

Chapitre 13

Préservation temporelle de l'électrisation des corps

Ce chapitre présente certaines procédures qui permettent d'augmenter la durée pendant laquelle un corps peut rester électrisé.

13.1 Décharge dans l'air

Expérience 13.1 — Décharge d'un isolant

Les isolants et les conducteurs électrisés perdent généralement leur charge en quelques minutes à l'air libre.¹

Prenons l'exemple d'une paille en plastique électrisée après avoir été frottée dans des cheveux. Elle attire les morceaux de papier à proximité, figure 13.3. Cependant, après quelques minutes ou quelques heures, la paille frottée n'attire plus les petits morceaux de papier, figure 13.1.

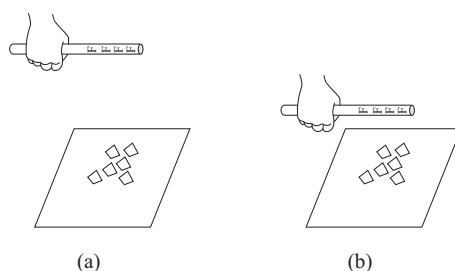


FIG. 13.1 : (a) Une paille frottée éloignée de petits morceaux de papier. (b) Une paille frottée perd son électrisation plusieurs heures après le frottement initial. Elle n'attire plus les petits morceaux de papier lorsqu'on l'approche d'eux.

¹Sections 7.13 et 7.14 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

Le temps nécessaire pour qu'une paille frottée perde son électricité dépend de plusieurs facteurs : la conductivité de l'air, la quantité d'électricité qu'elle a acquise lors du frottement initial, la qualité isolante du plastique, etc. Par temps très sec, une paille bien chargée peut rester électrisée pendant plusieurs heures. Par temps humide, elle se décharge en quelques minutes.

Expérience 13.2 — Décharge d'un conducteur

Un conducteur perd également son électrisation à l'air libre. Frottez une paille en plastique dans des cheveux, puis raclez-la sur le carton fin pour charger l'électroscope, figure 13.2 (a). Laissez-le sur une table par temps sec. Il se décharge lentement, comme on peut le voir à sa bande. Après quelques minutes ou une heure, il est totalement déchargé, figure 13.2 (b).

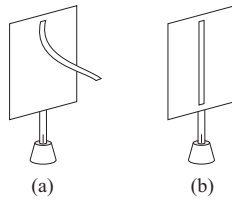


FIG. 13.2 : (a) Un électroscope chargé. (b) L'électroscope est complètement déchargé après une heure à l'air libre.

Le temps de décharge dépend à nouveau de plusieurs facteurs : les conditions atmosphériques, la quantité d'électricité reçue en raclant la paille sur le carton, la forme et la taille de l'électroscope, la conductivité de la paille qui soutient le carton, etc. Plus le temps est sec, plus il restera électrisé longtemps.

Comment pouvons-nous augmenter la durée pendant laquelle les isolants et les conducteurs restent électrisés ?

13.2 Préserver l'électrisation des isolants

Le moyen le plus simple d'augmenter la durée d'électrisation d'un isolant chargé est d'empêcher son contact avec l'air libre.²

Expérience 13.3 — Envelopper un isolant chargé avec un conducteur

Électrisez 10 ou 20 pailles en plastique de manière égale en frottant chacune d'elles vigoureusement dans des cheveux ou avec un morceau de papier. Placez-les côte à côte sur un morceau de tissu en coton ou une feuille de papier (comme une serviette en papier), figure 13.3 (a). Couvrez les pailles, figure 13.3 (b). L'ensemble de pailles emballées peut être conservé dans une boîte à chaussures.

²[Gra32b], [Bos11, chapitre 8] et [BAC12, chapitre 9].

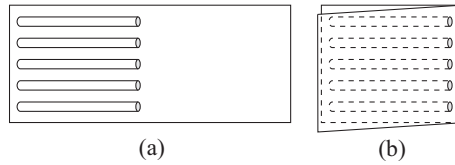


FIG. 13.3 : (a) Paille frottée avec un morceau de coton ou de papier. (b) Paille enveloppée.

À intervalles réguliers (une fois par jour ou une fois par semaine), retirez l'une des pailles et testez son électrisation. Utilisez des tests sensibles afin de détecter de petites quantités d'électricité. Observez si elle attire la bande de papier de soie d'un électroscope déchargé, si elle attire le disque de papier d'un pendule électrique déchargé ou si elle oriente un versorium métallique. Lorsque les pailles enveloppées sont initialement bien chargées, observez qu'elles restent électrisées pendant des jours, des semaines, voire quelques mois.

L'intervalle de temps pendant lequel la paille reste électrisée dépend à nouveau de plusieurs facteurs tels que les conditions météorologiques, le degré de charge qu'elle a reçu par frottement, si le plastique de la paille est un bon ou un mauvais isolant, etc.

Expérience 13.4 — Envelopper un isolant chargé avec un autre isolant

Dans l'expérience 13.3, les pailles ont été enveloppées dans des conducteurs tels que du coton ou du papier. Répétez cette procédure, mais cette fois-ci en enveloppant les pailles frottées dans un sac en plastique isolant. Dans cette situation, les pailles restent également électrisées pendant plusieurs jours, semaines ou quelques mois.

Expérience 13.5 — Envelopper une paille chargée avec une feuille de papier et un sac en plastique

Vous pouvez également observer combien de temps les pailles frottées enveloppées dans des conducteurs (comme une feuille de papier) restent électrisées, par rapport aux pailles frottées enveloppées dans des isolants (comme un sac en plastique). Le même jour, enveloppez certaines d'entre elles dans des conducteurs et d'autres dans des isolants, en supposant que les pailles soient électrisées de manière égale avant de les recouvrir. De temps en temps, retirez une paille enveloppée dans un conducteur et une autre paille enveloppée dans un isolant. Vérifiez l'électrisation de chacune d'entre elles.

En réalisant cette expérience, nous remarquons parfois que, le même jour, les pailles enveloppées dans un isolant conservent leur électrisation avec une intensité plus élevée que celles enveloppées dans un conducteur. Nous observons également que les pailles enveloppées dans un isolant restent électrisées plus longtemps que celles enveloppées dans un conducteur.

Le tableau 13.1 compare les intervalles de temps pendant lesquels les pailles chargées restent électrisées lorsqu'elles sont maintenues à l'air libre, enveloppées dans un papier ou dans un sac en plastique.

TAB. 13.1 : Intervalles de temps approximatifs pour décharger une paille électrisée.

Condition	Durée
À l'air libre	Quelques minutes
Enveloppé dans un conducteur	Jours, semaines ou quelques mois
Enveloppé dans un isolant	Jours, semaines ou quelques mois

Expérience 13.6 — *Décharge d'une plaque électrisée dans l'air*

Utilisez dans cette expérience des planches ou des plaques en PVC ou en polystyrène. Elles peuvent avoir n'importe quelle forme. Elles peuvent être, par exemple, un carré de 20 ou 30 cm de côté, un cercle de 20 ou 30 cm de diamètre, etc. Frottez vigoureusement l'une de leurs faces avec un morceau de papier, une serviette ou un mouchoir en papier. Placez ensuite ces plaques à l'air libre, la face frottée vers le haut. Testez leur électrisation toutes les 10 minutes. Vérifiez, par exemple, si la face frottée attire la bande de papier de soie d'un électroscope déchargé, si elle attire le disque de papier d'un pendule électrique déchargé ou si elle oriente un versorium métallique. Mesurez combien de temps chaque face reste électrisée.

En fonction des conditions météorologiques, des propriétés isolantes de la plaque et du degré de charge initiale acquise par frottement, les plaques peuvent rester électrisées pendant 10 minutes à une heure environ.

Expérience 13.7 — *Plaques électrisées superposées*

Répétez l'expérience 13.6. Électrisez des paires de plaques du même matériau, de même forme et de taille égale. Superposez les plaques du même matériau avec les côtés frottés face à face. Attachez-les ensemble avec des élastiques. Les paires sont ensuite stockées dans une boîte à chaussures. De temps en temps, ouvrez l'une de ces paires et testez l'électrisation des faces internes. Si la paire reste électrisée, superposez à nouveau les faces frottées et rangez-les dans la boîte à chaussures.

Vérifiez à l'aide de cette procédure que les faces frottées peuvent rester électrisées pendant des jours, des semaines ou quelques mois, tableau 13.2. Comme toujours, le temps de décharge dépend de la quantité de charge initiale acquise par frottement, de la propriété isolante de la plaque, des conditions météorologiques, etc.

TAB. 13.2 : Intervalles de temps approximatifs pour décharger une plaque isolante électrisée.

Une plaque à l'air libre	Quelques minutes à 1 heure
Plaques superposées	Jours, semaines ou quelques mois

13.2.1 Quelques commentaires sur ces expériences

Les expériences présentées dans cette section montrent que la durée pendant laquelle un isolant reste électrisé peut être considérablement augmentée en le protégeant de l'air ambiant. Il est évident que les pailles frottées restent en contact avec l'air lorsqu'elles sont enveloppées dans un morceau de papier, de tissu ou de plastique. Il en va de même lorsque deux plaques frottées sont superposées et conservées dans une boîte à chaussures. Dans tous les cas, les molécules d'air autour de ces corps enveloppés restent approximativement les mêmes au fil du temps. En revanche, lorsqu'un corps électrisé est conservé à l'air libre, il y aura différentes molécules d'air et ions chargés autour de lui. Cet aspect peut être l'une des principales raisons qui augmentent le temps de décharge des corps enveloppés par rapport au faible temps de décharge des corps conservés à l'air libre.

Une paille électrisée peut se décharger à l'air libre par le mécanisme ACR. La vapeur d'eau, les autres particules, molécules et ions présents dans l'air peuvent être attirés par la paille, la toucher, acquérir une partie de la charge de la paille, puis être repoussés par celle-ci. Une paille enveloppée réduit la possibilité de ce mécanisme.

Un autre aspect peut également être pertinent. Lorsqu'une paille en plastique électrisée est recouverte d'un matériau conducteur ou isolant, une redistribution des charges a lieu dans ces matériaux de recouvrement. Par conséquent, « la force totale ou résultante » agissant sur les particules d'air externes a désormais une intensité moindre. Ces particules d'air externes contiennent des molécules, des ions, des impuretés, etc. La force totale exercée sur elles par le corps enveloppé est désormais due non seulement à la paille électrisée, mais aussi aux charges redistribuées sur le matériau conducteur ou isolant autour de la paille. La force totale agissant sur toute particule externe est désormais plus faible que la force due uniquement à la paille. Ces particules externes ont alors moins tendance à interagir avec la paille électrisée.

13.3 Préserver l'électrification des conducteurs

Expérience 13.8 — Bouteilles de Leyde

L'expérience 13.2 montre qu'un conducteur chargé à l'air libre perd son électrisation en quelques minutes. Nous présentons maintenant une procédure qui augmente considérablement la conservation de cette électrisation.

Utilisez ici la bouteille de Leyde fabriquée à partir d'une bouteille en verre de 200 ou 300 ml.³ Idéalement, vous devriez disposer de 5 ou 10 bouteilles de taille et de forme identiques, fabriquées à partir des mêmes matériaux. L'une de ces bouteilles apparaît dans la figure 12.2. Elle sera électrisée à l'aide d'un électrophore de Volta fabriqué à partir d'un moule à pizza de 30 cm de diamètre muni d'une poignée en PVC, en acrylique ou en plastique dur. La base isolante de cet électrophore peut être une plaque carrée en PVC de 40 cm de côté. Cette base isolante est électrisée en la frottant vigoureusement avec une serviette en papier ou un mouchoir en coton, figure 6.1 (a). Le moule à pizza est électrisé en suivant la procédure décrite dans les figures 6.2 à 6.4.

³Section 12.1 et [MFsd].

Le moule à pizza est déchargé lorsqu'il est approché très près de la boule métallique d'une bouteille de Leyde mise à la terre, figure 12.6. La bouteille de Leyde peut être bien électrisée en répétant cette procédure une vingtaine de fois. Une fois chargées, les bouteilles doivent être conservées sur une étagère, dans un placard ou une dans une armoire, en notant la date à laquelle elles ont été électrisées.

À intervalles réguliers (1 heure, 1 jour ou 1 semaine), testez l'électrisation de l'une de ces bouteilles. Pour ce faire, il suffit de toucher d'un doigt la bande conductrice externe de la bouteille et d'approcher un autre doigt de la même main très près de la boule métallique de la bouteille. Supposons qu'il y ait une étincelle comme celle de la figure 12.7. Cela signifie que la bouteille est restée électrisée depuis le moment initial jusqu'à cette décharge. La bouteille déchargée ne doit plus être utilisée dans cette expérience. À un autre intervalle de temps égal, testez la charge d'une autre bouteille conservée sur l'étagère. Suivez la même procédure jusqu'à ce que toutes les bouteilles aient été déchargées.

En réalisant cette expérience, concluez qu'une bouteille chargée peut rester électrisée pendant quelques jours (une semaine, par exemple). L'intervalle de temps exact dépend de la quantité initiale d'électrisation, des propriétés isolantes de la bouteille, de sa taille et de sa forme, etc.

Cette expérience peut également être réalisée avec une seule bouteille. Suivez la procédure de cette expérience pour la charger. Après 1 heure, 1 jour ou 1 semaine, testez son électrisation. Une fois la bouteille déchargée, rechargez-la à peu près à la même quantité initiale en suivant la procédure de cette expérience. Puis, après 2 heures, 2 jours ou 2 semaines, testez son électrisation. Une fois déchargée, rechargez-la une nouvelle fois en suivant la procédure de cette expérience. Puis, après 3 heures, 3 jours ou 3 semaines, testez son électrisation. Continuez cette procédure jusqu'à ce que la bouteille ne soit plus électrisée après un certain temps (qui peut être de 10 heures, 10 jours ou 10 semaines, par exemple). Découvrez combien de temps elle reste électrisée lorsqu'elle est stockée dans un endroit sûr et qu'elle n'est soumise à aucune action.

Nous pouvons alors comparer l'expérience 13.2 avec les expériences de cette section. Ces dernières expériences montrent que les charges situées sur les conducteurs internes et externes d'un condensateur tel qu'une bouteille de Leyde sont stockées plus longtemps que les charges réparties sur le carton conducteur d'un électroscope maintenu à l'air libre.

13.4 Électrets

13.4.1 Définitions

Un « électret » est un morceau de matériau isolant ou diélectrique présentant une charge électrique permanente ou une polarisation électrique permanente. En réalité, le degré d'électrisation d'un corps diminue avec le temps. Cependant, lorsque la constante de temps caractéristique de la diminution de la charge est beaucoup plus longue que les périodes pendant lesquelles des études sont menées avec ce matériau, le corps électrisé peut être considéré comme un électret. Par exemple, lorsque

l'expérience dure quelques secondes, un corps dont l'électrisation dure quelques minutes peut être considéré comme un électret. En ce sens, les pailles ou les règles en plastique électrisées par frottement peuvent être considérées comme des électrets dans la plupart des expériences décrites dans cet ouvrage. Il existe certains instruments dans lesquels les corps internes doivent rester électrisés pendant des semaines ou des mois. Dans ces cas, un corps qui reste électrisé pendant un an peut être considéré comme un bon électret. Nous pouvons maintenant clarifier la définition :

Définition 13.1

Les « électrets » sont des morceaux de matériaux isolants présentant une électrisation quasi permanente ou une polarisation dipolaire, avec une constante de temps caractéristique pour la décroissance de la charge beaucoup plus longue que la période pendant laquelle les études sont effectuées avec le corps.

En général, le mot « électret » n'est utilisé que lorsque l'électrisation ou la polarisation dure plusieurs mois, années ou décennies. Ce mot a été inventé en 1885 par Oliver Heaviside (1850–1925) :^{4,5}

Il est évident qu'il manque un mot pour décrire un corps qui est naturellement et en permanence électrisé par des causes internes. Remarquant que « magnet » (aimant) est dérivé de « magnétisme » par raccourcissement à la troisième articulation à partir de la fin, il est suggéré que nous pourrions obtenir ce que nous voulons en effectuant la même opération sur « électricité ». Le résultat, « électrique », serait un très bon nom pour désigner un corps intrinsèquement électrisé, si ce n'était que pour deux raisons. Premièrement, il était autrefois utilisé pour désigner ce que nous appelons aujourd'hui un diélectrique ou un isolant ; et deuxièmement, « électrique » est aujourd'hui utilisé comme adjectif, ou, de manière équivalente, « électricité ». La première de ces objections n'a guère de poids, l'utilisation du mot comme nom étant totalement obsolète. La seconde est plus importante, mais reste sans grande importance. Un autre mot qui vient à l'esprit est « électret », contre lequel il n'y a rien à dire si ce n'est qu'il semble étrange. Il s'agit toutefois d'une simple question d'habitude.

Il existe plusieurs types d'électrets et diverses méthodes de production. Il existe également de nombreuses classifications des électrets qui varient d'un auteur à l'autre. Nous présentons ici une classification simple.

Les électrets dont la charge totale, résultante ou nette est différente de zéro sont appelés « électrets monopolaires », « électrets à charge excédentaire », « électrets à

⁴[Hea87, Article 30 : Electromagnetic induction and its propagation, Section 12 : Electrification and Electrification. Natural Electrets, p. 488], [JW80] et [Sil10b, p. 30].

⁵A word is evidently wanted to describe a body which is naturally permanently electrized by internal causes. Noticing that "magnet" is got from "magnetism" by curtailment at the third joint from the end, it is suggested that we may get what we want by performing the same operation upon electricity. An "electric," which is what results, would be a very good name for an intrinsically electrized body, but for two reasons. First, it was once used to signify what we should now call a dielectric or an insulator ; and secondly, electric is now used as an adjective, or, equivalently, electrical. The former of these objections is of hardly any weight, that use of the word as a substantive being wholly obsolete. The latter is heavier, but still of no great importance. Another word that suggests itself is electret, against which there is nothing to be said except that it sounds strange. That is, however, a mere question of habit.

charge réelle» ou «électrets à charge nette». La figure 13.4 (a) illustre un électret à charge superficielle, tandis que la figure 13.4 (b) montre un matériau à charge réelle répartie à l'intérieur du diélectrique, parfois appelé « électret à charge spatiale ».

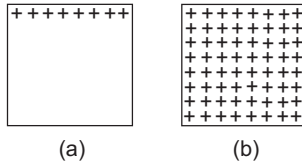


FIG. 13.4 : (a) Électret avec charge superficielle réelle. (b) Électret à charge spatiale avec excès de charge réel dans le volume du diélectrique.

Les corps dont la charge totale est nulle et qui présentent une polarisation électrique permanente sont appelés électrets bipolaires, dipolaires ou polarisés. La figure 13.5 (a) représente un électret polarisé avec des charges superficielles réelles et opposées. La figure 13.5 (b) montre un électret polarisé avec des charges réelles opposées réparties dans le volume du diélectrique. La figure 13.5 (c) illustre un électret contenant des dipôles moléculaires orientés (alignés).

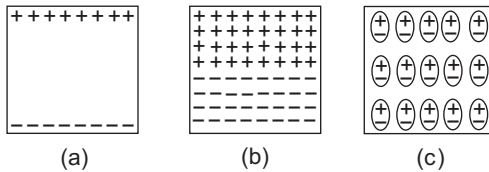


FIG. 13.5 : Électrets polarisés. (a) Avec des charges superficielles réelles et opposées. (b) Avec des charges réelles opposées réparties dans le volume du diélectrique. (c) Contenant des dipôles moléculaires orientés.

L'électret de la figure 13.5 (c) est l'équivalent électrostatique d'un aimant permanent.

Un électret général peut avoir des charges quasi permanentes de tous ces types, figure 13.6.

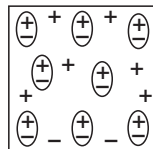


FIG. 13.6 : Un électret générique.

Dans les applications pratiques, il existe des électrets dont une ou deux faces sont recouvertes d'une couche conductrice. Ces cas ne seront pas abordés ici.

13.5 Production d'électrets

13.5.1 Matériaux

Nous montrons ici comment produire des électrets qui restent électrisés ou polarisés pendant des jours, des semaines ou des mois. Ces expériences ont été réalisées par Silva Junior et Boss.⁶

Il convient d'être prudent lors de la réalisation de ces expériences, car elles impliquent l'utilisation de feu, de gaz et de fumée provenant de différentes substances. Certaines procédures de sécurité sont décrites dans la littérature spécialisée.⁷

Les matériaux utilisés dans ces expériences sont la paraffine, la cire d'abeille, la cire de carnauba et la gomme laque. La cire de paraffine est généralement dérivée du pétrole et utilisée pour fabriquer des bougies. La paraffine utilisée dans ces expériences peut être obtenue à partir de bougies ou achetée sous forme de barres rigides ou de tablettes. La cire de carnauba est obtenue à partir des feuilles d'un palmier originaire du nord-est du Brésil. Elle se présente généralement sous forme de flocons durs jaunes ou bruns, parfois sous forme de barres rigides ou de tablettes. La gomme laque, ou simplement laque, est une substance résineuse sécrétée par des espèces de cochenilles sur des arbres en Inde et en Thaïlande. Elle est généralement vendue sous forme de flocons secs et utilisée comme colorant ou finition pour le bois. Ces matériaux sont disponibles dans les magasins de peinture ou de matériaux de construction, les menuiseries et certains supermarchés.

Le point de fusion de ces substances varie entre 60 et 80 degrés Celsius. Elles peuvent être fondues à la flamme d'une cuisinière à l'aide d'un moule à tarte en métal, d'une louche en aluminium ou en fer, d'un verre, etc.

Expérience 13.9 — *Comportement isolant avant fusion*

Avant de faire fondre ces substances, testez leur comportement isolant ou conducteur en utilisant les procédures décrites dans la section 3.1. Pour les substances liquides ou celles qui se présentent sous forme de flocons, un bord de l'électroscope chargé doit les toucher, comme dans la figure 3.6.

Observez que la bande de papier de soie d'un électroscope chargé reste relevée lorsque toutes les substances de cette sous-section touchent le carton, ce qui montre qu'elles sont isolantes.

Expérience 13.10 — *Neutralité de charge avant fusion*

Vérifiez également si l'une de ces substances est électrisée avant de la faire fondre. Ce test peut être effectué en approchant l'une de ces substances d'un versorium métallique, du disque en papier d'un pendule électrique déchargé, de la bande de papier de soie d'un électroscope déchargé ou d'un mince filet d'eau s'écoulant régulièrement d'un robinet. Lorsque ces corps ne sont pas attirés par cette substance, concluez

⁶[Sil10a], [Bos11, section 8.2, pp. 234–248] et [BAC12, chapitre 19].

⁷[Bos11, section 8.2] et [BAC12, section 19.3].

qu'elle est neutre ou déchargée. C'est la situation la plus courante lors de la réalisation de ce test.

La cire de carnauba présente parfois un faible degré d'électrisation sur certains de ses côtés avant d'être fondue. Les autres substances n'attirent normalement pas ces corps conducteurs.

13.5.2 Fabrication d'électrets

Pour produire des électrets, faites fondre ces substances dans les récipients indiqués, attendez qu'elles refroidissent et se solidifient, puis réchauffez brièvement les récipients pour libérer les matériaux. L'ensemble de la procédure dure environ 4 heures, y compris la préparation du matériau, la production des électrets et le nettoyage de l'environnement de travail. Nous vous suggérons de faire un essai sur une journée entière afin de maîtriser l'ensemble du processus, de découvrir ce qui est nécessaire à chaque étape, de connaître les matériaux et les procédures requis, etc. Ensuite, fort de toutes ces connaissances acquises, produisez un autre jour les électrets qui seront utilisés dans les expériences suivantes.

Les électrets sont généralement préparés en combinant différentes quantités de ces substances, comme un mélange de cire et de résine. Cependant, dans les expériences décrites ici, nous n'utiliserons qu'une seule substance dans chaque récipient.

Les cires et les paraffines ont été cassées en morceaux avant d'être placées dans les récipients. Placez les récipients directement sur le feu ou chauffez-les au bain-marie (bain d'eau) qui chauffe les substances doucement et progressivement. Une fois la substance fondue, le récipient est retiré de la source de chaleur jusqu'à ce que la substance refroidisse et se solidifie. Ce processus dure entre 1 et 3 heures. L'eau ne doit à aucun moment pénétrer dans les récipients pendant toute la durée de cette procédure. La substance sera retirée du récipient après avoir refroidi à température ambiante. Une poignée isolante est utile pour retirer la substance et la manipuler dans le cadre des expériences. À cette fin, la poignée doit être insérée dans la substance avant qu'elle ne se solidifie. La poignée peut être, par exemple, un tube en plastique ou une règle en acrylique, figure 13.7 (a). Lorsque la substance refroidit et devient rigide, le récipient doit être brièvement réchauffé afin de retirer l'électret, figure 13.7 (b).

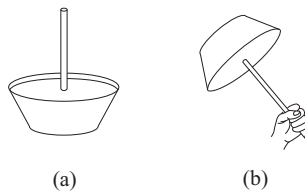


FIG. 13.7 : (a) Substance fondue avec poignée isolante à l'intérieur du récipient chauffant. (b) Électret solide.

Cependant, il n'est parfois pas facile de retirer l'électret réchauffé du récipient, même à l'aide d'une poignée. Il peut être nécessaire de déformer le moule à tarte en métal ou de casser le verre pour le retirer. La gomme laque, par exemple, peut

devenir poudreuse ou fragile, ce qui rend difficile son retrait en un seul morceau. La paraffine rétrécit légèrement lorsqu'elle se solidifie. Il est parfois possible de la retirer du récipient sans avoir à la réchauffer.

Expérience 13.11 — *Comportement isolant après fusion*

Après avoir préparé les électrets, testez leur comportement isolant ou conducteur comme dans l'expérience 13.9.

Tenez l'électret à la main et touchez le bord supérieur d'un électroscope chargé. La bande de papier de soie ne tombe pas. Concluez que toutes ces substances se comportent comme des isolants après avoir été fondues.

L'expérience 13.12 montrera que ces substances sont électrisées après avoir été fondues et solidifiées. Cependant, comme elles se comportent toujours comme des isolants après avoir été retirées des récipients, vous pouvez les toucher avec la main sans les décharger.

Expérience 13.12 — *Électrisation des substances après fusion*

Tenez chaque pièce par la poignée ou directement dans la main, et testez son électrisation en suivant les procédures de l'expérience 13.10.

Nous constatons généralement que la paraffine, la gomme laque, la cire de carnauba et la cire d'abeille sont électrisées. En d'autres termes, elles attirent les pattes d'un versorium métallique, le disque en papier d'un pendule électrique déchargé, la bande de papier de soie d'un électroscope à décharge et le mince filet d'eau s'écoulant d'un robinet. Cette électrisation se produit quel que soit le récipient dans lequel elles ont été fondues (aluminium, fer ou verre). L'électrisation de la cire d'abeille est parfois très faible et difficile à détecter.

Expérience 13.13 — *Signe de la charge des électrets après fusion*

Électrisez deux électroscopes par induction, l'un positivement et l'autre négativement.⁸ Placez-les sur une table, séparés l'un de l'autre. Approchez lentement l'électret de la bande surélevée de chaque électroscope. Normalement, la substance repousse la bande de l'électroscope négatif et attire la bande de l'électroscope positif, ce qui montre que l'électret est chargé négativement.

Ne rapprochez pas trop l'électret de la bande surélevée lorsqu'il y a une répulsion entre eux. Après tout, la répulsion peut se transformer en attraction lorsque cette distance devient très petite.⁹

Expérience 13.14 — *Intervalle de temps pendant lequel les substances restent électrisées à l'air libre*

Après avoir préparé les morceaux, placez-les à l'air libre. De temps en temps, testez leur électrisation comme dans l'expérience 13.12.

⁸Section 7.5 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

⁹Section 7.10 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

Les morceaux de paraffine restent électrisés entre quelques heures et quelques jours. Les morceaux de cire de carnauba restent électrisés entre quelques jours et quelques mois.

Expérience 13.15 — *Intervalle de temps pendant lequel les substances restent électrisées lorsqu'elles ont été conservées dans les conteneurs dans lesquels elles avaient été fondues*

Après avoir été fondus et retirés des récipients, certains morceaux ont été replacés dans ces récipients après avoir refroidi. De temps à autre, nous avons retiré l'un de ces morceaux. Nous avons testé son électrisation comme dans l'expérience 13.12. Nous avons ensuite replacé le morceau dans le récipient. Cette procédure a été répétée jusqu'à ce que le morceau ne présente plus aucun signe d'électrisation.

Les morceaux de paraffine restèrent électrisés pendant environ 5 à 20 jours. Les morceaux de cire de carnauba restèrent électrisés pendant plusieurs mois.

Expérience 13.16 — *Intervalle de temps pendant lequel les substances restèrent électrisées lorsqu'elles ont été conservées dans les récipients dans lesquels elles avaient été fondues, avec un sac en plastique placé entre le récipient et la substance*

Après avoir préparé quelques morceaux de paraffine, ceux-ci ont été retirés des récipients. Ces récipients ont ensuite été emballés dans un sac en plastique et les substances ont été replacées dans les récipients. De temps à autre, les substances ont été retirées. Nous avons testé leur électrisation et les avons replacées dans les récipients emballés. Cette procédure a été répétée jusqu'à ce qu'elles ne présentent plus aucun signe d'électrisation, soit environ 7 ou 8 jours après avoir été fondues.

Expérience 13.17 — *Intervalle de temps pendant lequel les substances restent électrisées lorsqu'elles ont été enveloppées dans des conducteurs et conservées dans les conteneurs dans lesquels elles avaient été fondues*

Certaines des morceaux de paraffine, après avoir été fondus et solidifiés, ont été enveloppés dans un conducteur (flanelle de coton ou serviette en papier) et replacés dans les récipients dans lesquels ils avaient été fondus. De temps en temps, ils ont été déballés. Nous avons testé leur électrisation, enveloppé les morceaux et les avons replacés dans les récipients. Cette procédure a été répétée jusqu'à ce qu'ils ne montrent plus aucun signe d'électrisation. Ils restèrent électrisés pendant 7 à 12 jours.

Expérience 13.18 — *Intervalle de temps pendant lequel les substances restent électrisées lorsqu'elles étaient enveloppées dans des conducteurs*

Nous avons retiré les poignées de certaines pièces et les avons enveloppées dans des conducteurs (flanelle de coton, serviette ou morceau de papier). Nous avons placé les pièces enveloppées dans une boîte à chaussures. De temps en temps, nous retirions l'une des pièces. Nous testions ensuite son électrisation comme dans l'expérience 13.12. Après chaque test, la pièce était à nouveau enveloppée et restait dans la boîte jusqu'au test suivant.

Les morceaux de cire d'abeille étaient encore électrisés après environ 5 mois. Certains morceaux de paraffine étaient encore électrisés après 7 mois, d'autres après 10 mois, lorsque nous avons arrêté les tests, bien qu'ils soient restés électrisés. Les morceaux de gomme laque et de cire de carnauba étaient encore électrisés après 10 mois ; bien que tous ces morceaux soient restés électrisés, nous avons arrêté les tests à 10 mois.

Il convient de noter que le degré d'électrisation de ces pièces diminuait avec le temps. Autrement dit, l'attraction qu'elles exerçaient sur les corps voisins diminuait en intensité au fil des jours ou des mois que duraient les expériences. Il était parfois nécessaire d'approcher les pièces très près de conducteurs initialement neutres afin de détecter une attraction de ces conducteurs.

Les expériences 13.14 à 13.18 indiquent que ces morceaux peuvent réellement être considérés comme des électrets, car ils restent électrisés pendant des jours ou des mois après avoir été fondus.

13.6 Électrophore avec une base en électret

Au chapitre 6, nous avons décrit un électrophore composé de deux parties, à savoir (a) une base isolante électrisée et (b) un collecteur de charge composé d'un disque conducteur muni d'une poignée isolante. Nous avons réalisé plusieurs expériences à l'aide d'une base en polystyrène ou en PVC électrisée en la frottant avec une serviette. Toutes ces expériences peuvent être reproduites en remplaçant la base électrisée par un électret (comme un disque de paraffine ou une plaque de cire de carnauba).

Avantages de l'utilisation d'une plaque de polystyrène ou de PVC électrisée comme base de l'électrophore : ces plaques sont très faciles à se procurer et il est simple de les électriser par friction. Inconvénients : ces plaques se déchargent en quelques minutes. Il est alors nécessaire de frotter la plaque de temps en temps afin de pouvoir poursuivre les expériences.

Avantage de l'utilisation d'une base en électret : elle reste électrisée pendant quelques jours ou quelques mois, perdant très lentement son électrisation. L'inconvénient est la production des électrets, qui n'est pas si facile.

13.7 Stephen Gray, les électrets et la préservation temporelle de l'électrisation des corps

La production et certaines des principales propriétés des électrets ont été décrites pour la première fois par Stephen Gray, qui a présenté ses découvertes dans un article important publié en 1732.¹⁰ Dans le même ouvrage, il a décrit pour la première fois une procédure permettant de conserver l'électrisation des corps pendant très longtemps.

Du Fay a décrit ces découvertes de Gray en ces termes :¹¹

¹⁰[Gra32b], [Bos11, chapitre 8] et [BAC12, chapitre 9].

¹¹[DF34b, p. 341].

M. Gray a trouvé dans l'Électricité deux propriétés nouvelles, l'une qu'elle est permanente, c'est-à-dire, qu'elle peut subsister dans les corps très-long-temps après qu'elle y a été excitée, & l'autre qu'elle s'y trouve dans certains cas sans que les corps ayent été frottés.

Nous présentons ici certaines des parties principales de cet ouvrage extrêmement important de Gray, avec nos commentaires entre crochets et dans les notes de bas de page :¹²

Lettre de M. Stephen Gray au Dr Mortimer, Secr. R. S., contenant un compte rendu plus détaillé de ses Expériences concernant l'Électricité

Charter-House, le 7 juin 1732.

Monsieur,

Depuis ma dernière [publication dans les *Philosophical Transactions*] (N°422)¹³ dans lequel je rendais compte de mes expériences, montrant que l'eau est attirée par les corps électriques [c'est-à-dire par les isolants électrisés] et qu'elle peut se voir communiquer une vertu électrique, de sorte qu'elle attire les corps solides, je me suis lancé dans une autre enquête : pour savoir s'il n'y aurait pas un moyen de rendre cette propriété d'attraction électrique plus permanente dans les corps. Le degré de réussite de cette tentative apparaîtra dans les expériences que j'ai menées sur les différents corps mentionnés dans le catalogue suivant ;¹⁴ et comme ils ont tous été préparés de la même manière, à l'exception des numéros 18 et 19, qui seront décrits plus loin, une description générale de la méthode de préparation et de conservation dans un état d'attraction peut suffire.

¹² *A Letter from Mr. Stephen Gray to Dr. Mortimer, Secr. R. S. containing a farther Account of His Experiments concerning Electricity*

Charter-House, June 7th, 1732.

Sir,

Since my last [paper in the *Philosophical Transactions*] (N°422) wherein I gave an Account of my Experiments, shewing Water will be attracted by Electrick Bodies [that is, by electrified insulators], and that it may have an Electrick Vertue communicated to it, so as to attract solid ones, I have been upon another Enquiry; Whether there might not be a Way found to make this Property of Electrical Attraction more permanent in Bodies? How far I have succeeded in this Attempt, will appear by the Experiments I have made on the several Bodies mentioned in the following Catalogue; and as they were all of them prepared after the same manner, excepting Numb. 18 and 19, which shall be described afterwards, a general Description of the Method of preparing and preserving them in a State of Attraction, may suffice.

The bodies on which the Experiments were made, were Rosin both black and white, Stone-Pitch, Shell or Gum-Lac, Bees-Wax, and Sulphur. I procured three Iron Ladles of several Sizes, in which I melted these Substances, making use of that which I thought most convenient for the Quantity I designed to melt. When any of these Bodies were melted, they were taken off the Fire, and set by in the Ladle to cool and harden; then it was returned to the Fire, where it remained 'till it was melted about the Bottom and Sides of the Ladle, so as to be moveable; so that by inverting the Ladle it might be taken out; having the Form of nearly the Section of a Sphere, the Convex Surface, as also the Plain one, being naturally (if I may so say) polished, excepting the Sulphur, which cools without retaining its Polish, except when cast in Glass Vessels, as shall be shewed hereafter. I shall now proceed to the Experiments and Observations made on these Electric Bodies [that is, made on these insulators].

When any of them were taken out of the Ladle, and their Convex Surface hardened, they would not at first attract, 'till the Heat was abated, or 'till they came to a certain Degree of Warmth, and then there was a small Attraction; which Warmth I estimated to be nearly that of a Hen's Egg when just laid: The Attraction encreasing so, as when cold, to attract at least ten times farther than at first.

¹³ [Gra32a], [Bos11, Chapitre 7] et [BAC12, chapitre 8].

¹⁴ Ce catalogue figure à la page 250 de cet ouvrage.

Les corps sur lesquels les expériences ont été réalisées étaient de la colophane noire et blanche, de la poix de pierre, de la gomme laque, de la cire d'abeille et du soufre. Je me suis procuré trois louches en fer de différentes tailles, dans lesquelles j'ai fait fondre ces substances, en utilisant celle qui me semblait la plus appropriée pour la quantité que je comptais faire fondre. Une fois ces corps fondus, ils ont été retirés du feu et mis de côté dans la louche pour refroidir et durcir ; puis ils ont été remis sur le feu, où ils sont restés jusqu'à ce qu'ils fondent au fond et sur les côtés de la louche, de manière à pouvoir être déplacés ; ainsi, en retournant la louche, ils pouvaient être retirés ; prenant alors la forme d'une section presque sphérique, la surface convexe, ainsi que la surface plane, étant naturellement (si je puis dire) polies, à l'exception du soufre, qui refroidit sans conserver son poli, sauf lorsqu'il est coulé dans des récipients en verre, comme cela sera montré ci-après. Je vais maintenant passer aux expériences et observations effectuées sur ces corps électriques [c'est-à-dire sur ces isolants].

Lorsque l'un d'entre eux était retiré de la louche et que sa surface convexe durcissait, il n'attirait pas au début, jusqu'à ce que la chaleur diminue ou qu'il atteigne un certain degré de chaleur, puis il y avait une faible attraction ; j'ai estimé que cette chaleur était presque celle d'un œuf de poule fraîchement pondu : l'attraction augmentait ainsi, de sorte que lorsqu'il était froid, il attirait au moins dix fois plus loin qu'au début.

Gray n'a pas présenté les raisons qui l'ont poussé à choisir ces matériaux spécifiques. Il n'a pas non plus précisé pourquoi il s'attendait à ce qu'ils s'électrisent grâce à cette procédure. Quoi qu'il en soit, c'était un observateur attentif. Depuis 1708, il menait des expériences électriques. En 1729, il a découvert les conducteurs et les isolants en réalisant qu'après avoir frotté un tube de verre, le bouchon à l'extrémité du tube commençait à attirer les corps légers à proximité. Ce détail a attiré son attention. S'il avait frotté le bouchon en le tenant à la main nue, celui-ci n'aurait pas attiré les corps légers à proximité.¹⁵ En poursuivant ces expériences, il découvrit qu'il pouvait communiquer la vertu électrique (ou la propriété d'attirer les corps légers) à certaines substances qui n'étaient pas frottées mais qui étaient en contact avec le tube de verre électrisé. Ces substances sont aujourd'hui appelées conducteurs. D'autres substances ne permettaient pas le flux et la dissipation de la vertu électrique vers le sol, elles sont aujourd'hui appelées isolants. Il a décrit dans ses articles publiés les isolants suivants : fil de soie, lignes de pêche en crin de cheval, bloc de résine, verre chauffé, blocs de cire d'abeille, de soufre et de gomme laque. Il a peut-être observé par hasard que certaines de ces résines et cires étaient électrisées, *sans avoir été frottées au préalable*, car elles attiraient les corps légers placés à proximité. Il a peut-être soupçonné que certains de ces matériaux s'électrisaient lorsqu'ils étaient fondus. Cet article de 1732 pourrait être une étude systématique de cette observation fortuite. Les matériaux décrits par Gray dans cet article restaient électrisés pendant très longtemps, sans avoir été frottés au préalable. Ils sont aujourd'hui appelés électrets. Ils peuvent être électrisés selon sa procédure ou par d'autres moyens modernes d'électrisation. Il fut le premier à présenter une procédure de production d'électrets et une liste de matériaux pouvant devenir des électrets.

¹⁵ Annexe B de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

TAB. 13.3 : CATALOGUE des différents corps électriques [c'est-à-dire les isolants] mentionnés dans le discours précédent.

N°	Noms des différents corps.	Poids.		Mois.	Jours.
		Onces	Drachmes		
1	Colophane noire fine	2	0	janvier	31
2	Poix de pierre et colophane noire	2	2	janvier	31
3	Colophane fine et cire d'abeille	2	1	février	1
4	Poix de pierre	1	7	février	1
5	Soufre de pierre	3	6	février	4
6	Gomme-laque	10	0	février	10
7	Colophane noire fine	10	4	février	11
8	Cire d'abeille et colophane	9	0	février	12
9	Colophane 4 [parts], et gomme laque 1 part	10	0	février	12
10	Soufre	18	0	février	15
11	Poix de pierre	10	12	février	16
12	Colophane noire	23	0	février	23
13	Colophane blanche	7	12	février	25
14	Gomme-laque	11	14	février	26
15	Gomme-laque et colophane noire <i>ana</i>	9	12	février	26
16	Gomme-laque 4 parts, colophane 1 pt.	17	8	février	28
17	Gomme-laque, colophane noire fine <i>ana</i>	28	4	mars	2
18	Un cylindre de soufre en pierre	19	4	mars	20
19	Un grand cône de soufre en pierre	30	0	mars	29
20	Un bloc de soufre	11	4	avril	29

Dans la suite de cet article, Gray a présenté une autre découverte très importante, à savoir une procédure permettant d'augmenter l'intervalle de temps pendant lequel un corps peut rester électrisé :^{16,17}

¹⁶[Gra32b], [Bos11, chapitre 8] et [BAC12, chapitre 9].

¹⁷The manner of preserving them in a State of Attraction, was by wrapping them up in any thing that would keep them from the external Air; as at first for the smaller Bodies I used white Paper, but for the larger ones white Flannel; but afterwards found that black Worsted Stockings would do as well. Being thus clothed, they were put into a large Fir Box, there to remain 'till I had Occasion to make use of them.

The Cylinder of Sulphur, Numb. 18, was made by melting the Sulphur, and pouring into a Cylindrick Glass Vessel, which had first been heated, to prevent its cracking. When the Sulphur was hardened, it was somewhat less than the Glass; so that by inverting the Glass, it came out easily, and had a polished Surface almost as smooth as the Glass in which it was cast. The large Cone of Sulphur, Numb. 19, was made after the same manner; viz. by being cast in a large Drinking-Glass.

I am now to give an Account of the Observations made on the several Bodies mentioned in the Catalogue, but must first give a Description of the Catalogue. The first Column contains the Number, which in a small Piece of Paper is fixed on each of the Several Bodies; the Name of which is given in the second Column,

Pour les conserver dans un état d'attraction, je les enveloppais dans tout ce qui pouvait les protéger de l'air extérieur ; au début, j'utilisais du papier blanc pour les plus petits corps, et de la flanelle blanche pour les plus gros, mais j'ai ensuite découvert que des bas de laine noire faisaient tout aussi bien l'affaire. Ainsi enveloppés, ils étaient placés dans une grande boîte en sapin, où ils restaient jusqu'à ce que j'aie besoin de m'en servir.

Le cylindre de soufre, n° 18, a été fabriqué en faisant fondre le soufre et en le versant dans un récipient cylindrique en verre, qui avait d'abord été chauffé pour éviter qu'il ne se fêle. Une fois le soufre durci, il était légèrement plus petit que le verre, de sorte qu'en retournant le verre, il s'en est facilement détaché et présentait une surface polie presque aussi lisse que le verre dans lequel il avait été coulé. Le grand cône de soufre, n° 19, a été fabriqué de la même manière, c'est-à-dire en le coulant dans un grand verre à boire.

Je vais maintenant rendre compte des observations faites sur les différents corps mentionnés dans le catalogue, mais je dois d'abord donner une description du catalogue. La première colonne contient le numéro, qui est inscrit sur un petit

whether they are single or compound Substances. The third Column shews of what Weight they were of when melted, in Ounces and Drachms of *Averdupois* Weight. In the fourth Column you have the Days of the Month when the Body was melted and received its Form, and consequently when it first began to attract.

I did for thirty Days continue to observe every one of these Bodies, and found that at the End of the said Time they attracted as vigorously as at the first or second Day, as they do now at the writing hereof. By the Times mentioned in the Catalogue, being subtracted from any Time after, will be shewn how long any of the Bodies have continued their Attractive Vertue ; by which it will appear, that some of them have not lost their Attraction for more than four months :

So that we have some Reason to believe, that we have now discovered that there is a *perpetual attractive Power* in all Electric Bodies [that is, in all electrified insulators], without exciting by either rubbing, beating, &c. or any other Attrition. But this will further appear by the Account I am now to give of the two last Bodies mentioned in the Catalogue. The Cone of Sulphur, Numb. 19, that was cast in a large Drinking-Glass, in about two Hours after it was taken out of the glass, attracted, and the Glass attracted too, but at a small Distance. Next Day the Sulphur was taken out of the Glass, and then it attracted strongly, but there was now no perceivable Attraction of the Glass. Then the Cone of Sulphur was set with its Base upon the Lid of the Fir Box, wherein the other Electric Bodies lay, and the Glass whelmed over it. I examined it every Day after, and still found it to attract ; but finding the Place not so convenient having Occasion to look into the Box often, I removed it to the Table that stands between the two Windows of my Chamber, where it has continued to this Time, and whenever the Glass is taken off, attracts at near as great a Distance as the Sulphur that is clothed and shut up in the Box abovementioned. And though at first there was no Attraction, when the Glass was taken off, yet I now find, that in fair Weather the Glass also attracts, but not at so great a Distance as the Sulphur, which never fails to attract, let the Wind or Weather be never so variable, as do all the other Bodies mentioned in the Catalogue ; only in wet Weather the Attractions are not made at so great a Distance as in fair Weather.

Number 20 is a Cake of Sulphur that was melted ; and as the other Bodies have taken the Form of a Convex Section of a Sphere, this, when cold, was laid with its flat Side downwards, on the same Table with the Cone of Sulphur : They were both placed so near the Wall, as to prevent the Sun shining on them. This was, as the Catalogue shews, on the 18th of *April* ; and though it had no manner of Clothing or Covering, has attracted ever since. And in this, as in the other Bodies, the Attraction will be according to the Weather ; but when it attracts the strongest, it is not more than the tenth Part of what the Cone of Sulphur, that is covered, attracts.

The manner of observing these Attractions is best performed by holding the Attracting Body in one Hand, and a fine white Thread tied to the End of a Stick, in the other ; by this means far less Degrees of Attraction will be perceived, than by making use of Leaf-Brass. When the Thread is held at the utmost Distance, it may be attracted ; the Motion of it is at first very slow, but still accelerating as it approaches nearer to the attracting Body.

I am now on the Subject of permanent Attraction in Glass, then in the other Bodies, but have not yet compleated those Experiments, meeting with more Interruption by the Weather. [...]

morceau de papier fixé sur chacun des différents corps ; le nom de ceux-ci est indiqué dans la deuxième colonne, qu'il s'agisse de substances simples ou composées. La troisième colonne indique leur poids à l'état fondu, en onces et en drachmes de poids *Averdupois*.¹⁸ Dans la quatrième colonne, vous trouverez les jours du mois où le corps a fondu et pris sa forme, et par conséquent où il a commencé à exercer son attraction.

J'ai continué à observer chacun de ces corps pendant trente jours et j'ai constaté qu'à la fin de cette période, ils exerçaient une attraction aussi forte qu'au premier ou au deuxième jour, comme c'est le cas aujourd'hui, au moment où j'écris ces lignes. En soustrayant les moments mentionnés dans le catalogue de n'importe quel moment postérieur, on verra combien de temps chacun des corps a conservé son pouvoir d'attraction ; il apparaîtra ainsi que certains d'entre eux n'ont pas perdu leur attraction pendant plus de quatre mois :¹⁹ Nous avons donc des raisons de croire que nous avons désormais découvert qu'il existe une « force d'attraction perpétuelle » dans tous les corps électriques [c'est-à-dire dans tous les isolants électrisés], sans qu'il soit nécessaire de les exciter par frottement, battement, etc. ou toute autre forme d'attrition. Mais cela apparaîtra plus clairement dans le compte rendu que je vais maintenant donner des deux derniers corps mentionnés dans le catalogue. Le cône de soufre, n° 19, qui avait été coulé dans un grand verre à boire, environ deux heures après avoir été retiré du verre, attirait, et le verre attirait également, mais à une faible distance. Le lendemain, le soufre a été retiré du verre, et il a alors exercé une forte attraction, mais il n'y avait plus d'attraction perceptible du verre. Ensuite, le cône de soufre a été placé avec sa base sur le couvercle de la boîte en sapin, dans laquelle se trouvaient les autres corps électriques, et le verre a été renversé dessus. Je l'ai examiné tous les jours par la suite et j'ai constaté qu'il continuait à exercer une attraction ; mais trouvant l'emplacement peu pratique, car j'avais souvent besoin de regarder dans la boîte, je l'ai déplacé sur la table qui se trouve entre les deux fenêtres de ma chambre, où il est resté jusqu'à présent, et chaque fois que le verre est retiré, il exerce une attraction à une distance presque que le soufre qui est recouvert et enfermé dans la boîte susmentionnée. Et bien qu'au début, il n'y ait eu aucune attraction lorsque le verre a été retiré, je constate maintenant que par beau temps, le verre attire également, mais pas à une distance aussi grande que le soufre, qui n'a jamais cessé d'attirer, quel que soit le vent ou le temps, comme tous les autres

¹⁸1 once = (1/16) livre \approx 28.35 g, tandis que 1 drachme = (1/16) once = (1/256) livre \approx 1.772 g.

¹⁹Cette lettre était datée du 7 juin 1732. D'après ce paragraphe, il semble que le catalogue à la page 250 de cet ouvrage fasse référence à 1732, car Gray indique que certaines substances n'ont pas perdu leur pouvoir d'attraction pendant plus de quatre mois (c'est-à-dire du 31 janvier 1732, date à laquelle le corps a été fondu, au 7 juin 1732, date à laquelle l'article a été rédigé). Du Fay, en revanche, lorsqu'il évoque ces travaux, estime que ces corps ont conservé leur pouvoir d'attraction pendant un an et demi, [DF34b, p. 342] :

M. Gray enveloppoit alors ces différents corps dans du papier, dans de la flanelle, ou dans toute autre matière semblable, & ils y ont conservé leur électricité pendant plusieurs mois, & même jusqu'au temps qu'il écrit, qui étoit environ un an & demi après ses premières expériences.

Il nous semble que Du Fay a interprété le catalogue comme faisant référence à 1731. Cette interprétation était probablement due au fait que le volume 37 des *Philosophical Transactions* était lié à la période 1731–1732.

Quoi qu'il en soit, quelle que soit l'interprétation correcte, nous pouvons être sûrs que Gray a réussi à maintenir ses corps électrisés pendant une très longue période, d'au moins quatre mois.

corps mentionnés dans le catalogue; ce n'est que par temps humide que les attractions ne se produisent pas à une distance aussi grande que par beau temps.

Le n° 20 est un morceau de soufre qui a été fondu; et comme les autres corps ont pris la forme d'une section convexe d'une sphère, celui-ci, une fois refroidi, a été posé avec son côté plat vers le bas, sur la même table que le cône de soufre: ils ont tous deux été placés si près du mur que le soleil ne pouvait pas les éclairer. Comme le montre le catalogue, cela s'est produit le 18 *avril*;²⁰ et, bien qu'il n'ait été recouvert d'aucun vêtement ni d'aucune couverture, il a continué à exercer une attraction depuis lors. Et dans ce cas, comme dans les autres corps, l'attraction dépendra des conditions météorologiques; mais même lorsqu'elle est la plus forte, elle ne dépasse pas le dixième de celle exercée par le cône de soufre recouvert.

La meilleure façon d'observer ces attractions est de tenir le corps attractif dans une main et un fin fil blanc²¹ attaché à l'extrémité d'un bâton, dans l'autre; de cette manière, on percevra des degrés d'attraction bien moindres qu'en utilisant du laiton. Lorsque le fil est tenu à la distance maximale, il peut être attiré; son mouvement est d'abord très lent, mais il s'accélère à mesure qu'il se rapproche du corps qui l'attire.

Je travaille actuellement sur le sujet de l'attraction permanente dans le verre, puis dans les autres corps, mais je n'ai pas encore terminé ces expériences, car j'ai été interrompu par les conditions météorologiques. [...]

À partir de cette description, nous concluons que Gray a réussi à augmenter la durée pendant laquelle le corps restait électrisé de deux manières. La première consistait à envelopper le corps électrisé dans du papier, de la flanelle ou d'autres matériaux similaires. La deuxième consistait à les recouvrir dans le récipient où ils avaient été fondus ou durcis.

Lorsque le récipient était en verre, Gray a remarqué que non seulement la résine attirait les corps légers placés à proximité, mais que le verre lui-même était électrisé. Il est facile de détecter l'électrisation du récipient dans lequel le corps diélectrique a été fondu ou durci lorsque ce récipient est fait d'un matériau isolant comme le verre. Dans ce cas, le récipient peut être mis à la terre ou manipulé avec les mains sans perdre l'électricité qu'il a acquise. En revanche, lorsque ce récipient est fait d'un matériau conducteur comme le métal, il est plus difficile de savoir s'il a été électrisé pendant la production de l'électret à l'intérieur. Afin de détecter son électrisation, le récipient doit être isolé de la terre avant et après la préparation de l'électret. Vous pouvez ensuite tester sa charge après avoir retiré l'électret.

Dans la section 13.2, nous avons présenté quelques expériences dans lesquelles des pailles électrisées sont restées chargées pendant plusieurs mois. La seule condition était de les envelopper dans une serviette en papier, une flanelle de coton ou un sac en plastique afin d'empêcher leur contact avec l'air extérieur. Bien qu'il s'agisse d'expériences extrêmement simples, nous n'avons pas vu de procédures comme celle-ci décrites dans les manuels traitant de l'électricité. Quoi qu'il en soit, il s'agit d'une réalisation remarquable. À l'air libre, une paille frottée perd son électricité en quelques minutes ou en une heure. En revanche, lorsqu'elle est enveloppée dans une serviette

²⁰Le catalogue mentionne le 29 avril.

²¹Il s'agissait probablement d'un fil de coton ou de lin. Ces matériaux se comportent comme des conducteurs dans les expériences habituelles d'électrostatique. Gray utilise ici son fil pendulaire, voir la section 2.5.

en papier ou un sac en plastique, elle peut rester électrisée pendant environ 3 mois, voire plus.

Pour donner un ordre de grandeur, supposons qu'une paille chargée reste électrisée pendant 10 minutes lorsqu'elle est conservée à l'air libre. Supposons en outre qu'elle reste électrisée pendant 3 mois lorsqu'elle est enveloppée dans un sac en plastique. L'intervalle de temps pendant lequel elle reste électrisée a été multiplié par près de 13 000 simplement en l'enveloppant ! Il est étonnant de constater à quel point une procédure aussi simple peut avoir un impact considérable.

Notre inspiration pour essayer cette procédure nous est venue directement de cet article fondamental de Gray publié en 1732, dans lequel il utilisait cette technique avec ses électrets.

13.8 Développement et applications des électrets

Les électrets développés par Gray ont également été étudiés par Du Fay et d'autres scientifiques. Cependant, ce sujet est longtemps resté une simple curiosité scientifique. Heaviside a présenté en 1885 une recette théorique pour la production d'électrets à l'intérieur d'un condensateur haute tension.²² Cependant, ce n'est que dans les années 1920 que Momotaro Eguchi a fabriqué des électrets essentiellement conformes à cette procédure en utilisant un mélange de cire de carnauba et de résine.²³

Fukada a décrit les expériences d'Eguchi et la durée de l'électrisation de ses électrets comme suit :^{24,25}

Les électrets originaux, des diélectriques chargés en permanence, ont été préparés par Eguchi en 1924 à partir d'un mélange de cire de carnauba et de résine [1].²⁶ Un champ électrique d'environ 1,5 MV/m a été appliqué sur un mélange fondu à environ 130°C. Un disque d'électret composé de cire de carnauba et de résine, d'un diamètre de 20 cm et d'une épaisseur de 1 cm, est conservé au Musée des sciences de Tokyo. Ses charges superficielles subsistent 45 ans après sa fabrication et ont été observées comme représentant environ un septième des charges d'origine [2].²⁷

Depuis lors, les électrets ont été produits selon de nombreuses méthodes et procédures différentes. Ils sont généralement classés en fonction de leur technique de production.

²²[Hea87, Article 30 : Electromagnetic induction and its propagation, Section 12 : Electrification and Electrification. Natural Electrets, pp. 491–2], [JW80] et [Sil10b, pp. 20–22].

²³[Egu25], [Mas87] et [Sil10b].

²⁴[Fuk00].

²⁵The original electrets, permanently charged dielectrics, were prepared by Eguchi in 1924 using a mixture of carnauba wax and resin. An electric field of about 1.5 MV/m was applied on a molten mixture at about 130° C. A disk of electret made of carnauba wax and resin, 20 cm in diameter and 1 cm thick, is preserved at the Science Museum in Tokyo. Its surface charges remain 45 years after preparation and were observed to be approximately one-seventh the original charges.

²⁶[1] Eiichi Fukada et M. Eguchi, "On the permanent electret", *Phil. Mag.*, vol. 49, pp. 178–192, 1925. [Bien que la référence [1] de l'article de Fukada présente les auteurs comme indiqué ici, cet article a été rédigé uniquement par Eguchi, [Egu25].]

²⁷[2] T. Takamatsu et I. Sumoto, "Life time of carnauba wax electrets", *Riken Hokoku*, vol. 45, pp. 141–148, 1969 (en japonais).

Nous citons ici quelques applications des électrets :

- Comme base électrisée d'un électrophore.
- Microphones.
- Casques audio et haut-parleurs.
- Détecteurs de rayonnement.
- Dosimètres.
- Photocopieurs ou électrophotographie.
- Unités de stockage de mémoire ou enregistrement électrostatique.
- Détecteurs d'humidité.
- Batteries électrostatiques.
- Filtres à air.
- Détecteurs de vibrations.
- Détecteurs de pression.
- Moteurs électrostatiques.
- Générateurs de courant.
- Générateurs de tension.
- Figures de Lichtenberg.
- Etc.

Les électrets restent un domaine de recherche actif. Il existe plusieurs références traitant de ce sujet.²⁸

²⁸[Net94], [Gro54], [Jef59], [Jef73, Chapter 9 : Electret motors], [JW80], [Ses87], [Fer00], [MWW07], [MW08], [Sil10b] et [GB17, Chapter 7 : Excess charge in solids : electrets].

Chapitre 14

Les mystérieuses forces non électrostatiques

14.1 Force électrostatique ou force de Coulomb

Charles Augustin de Coulomb a découvert en 1785 la loi de la force entre deux corps électrisés. Il présenta ses résultats dans deux articles de 1785, publiés en 1788.¹ Il donna à ces corps électrisés différents noms, à savoir « masses électriques », « molécules électriques », « molécules électrisées » ou « densités de fluides électriques ».²

Dans le cas de corps électrisés avec des charges de même signe, Coulomb s'est exprimé comme suit :³

Loi fondamentale de l'électricité.

La force répulsive de deux petits globes électrisés de la même nature d'électricité est en raison inverse du carré de la distance du centre des deux globes.

Pour les corps chargés de signes opposés, Coulomb a conclu que :⁴

Nous voici donc parvenus, par une méthode absolument différente de la première, à un résultat semblable ; ainsi nous pouvons en conclure que l'attraction réciproque du fluide électrique appelé *positif*, sur le fluide électrique nommé ordinairement *négalif*, est en raison inverse du carré des distances ;

Jusqu'à présent, Coulomb n'avait mentionné que la variation de la force électrique en fonction de la distance entre les corps électrisés. Ce n'est que dans la dernière partie de son deuxième mémoire, lorsqu'il a récapitulé les principales propositions issues de ses recherches, qu'il a mentionné que cette force était proportionnelle au produit des densités du fluide électrique des deux corps électrisés (ou proportionnelle au produit des deux charges, comme on l'exprime habituellement) :⁵

¹[Cou88a], [Cou88b], [Pot84] et [Cou35].

²[Gil71b] et [Gil71a, pp. 190–192].

³[Cou88a, p. 572], [Pot84, p. 110] et [Cou35].

⁴[Cou88b, p. 572], [Pot84, p. 123] et [Cou35].

⁵[Cou88b, p. 611], [Pot84, p. 146] et [Gil71a, pp. 190–191].

Récapitulation des objets contenus dans ce Mémoire.

1° Que l'action, soit répulsive, soit attractive de deux globes électrisés et, par conséquent, de deux molécules électriques, est en raison composée des densités du fluide électrique des deux molécules électrisées et inverse du carré des distances; [...]

Gillmor a souligné à juste titre que Coulomb n'avait pas prouvé expérimentalement que la loi de la force électrique était proportionnelle au produit des charges.⁶ Il a seulement suggéré ou supposé cette proportionnalité, sans juger important de démontrer ce résultat expérimentalement. Depuis lors, différents points de vue ont été exprimés dans la littérature sur ce sujet.⁷ Certains auteurs affirment que l'intensité de la force électrique est « par définition » proportionnelle au produit des deux charges (c'est-à-dire que la quantité de charge dans un corps serait définie par la quantité de force qu'il produit). D'autres auteurs affirment que nous pouvons définir et mesurer la charge indépendamment de la définition et de la mesure de la force. Si tel est le cas, la proportionnalité entre la force électrique et le produit des deux charges pourrait être obtenue « expérimentalement ».

Cette force électrostatique est très similaire à la force gravitationnelle que Newton a présentée dans ses *Principia*.⁸ Cet ouvrage a été publié pour la première fois en 1687. Ces deux forces sont orientées le long de la ligne droite reliant les corps en interaction, elles suivent le principe d'action et de réaction, variant comme l'inverse du carré de la distance entre les particules. De plus, alors que la force électrique dépend du produit des amplitudes des deux charges, la force gravitationnelle est proportionnelle au produit des masses en interaction. Il semble que Coulomb soit parvenu à sa loi de la force davantage par analogie avec la loi de la gravitation de Newton que par ses quelques mesures douteuses effectuées à l'aide d'un balancier de torsion.⁹

Définition 14.1

L'interaction fondamentale qui caractérise les phénomènes électriques des charges au repos est appelée « force électrostatique », « force coulombique », « force de Coulomb » ou « loi de Coulomb ». Les particules chargées du même signe se repoussent, tandis que les particules chargées de signes opposés s'attirent. Cette force est proportionnelle au produit des charges des deux corps et varie inversement avec le carré de leur distance (en supposant que les corps sont de petite taille par rapport à la distance qui les sépare). Cette force suit le principe d'action et de réaction, et s'exerce le long de la ligne droite reliant les particules en interaction. Les forces dites « non électrostatiques » ou « non coulombiennes » sont les forces agissant sur les particules électrisées qui ne suivent pas la loi de Coulomb.

En 1822, André-Marie Ampère (1775–1836) a inventé les expressions « électrostatique » et « électrodynamique ».¹⁰

⁶[Gil71b] et [Gil71a, pp. 190–192].

⁷[BW13].

⁸[New90a], [New34], [New52], [New90], [New99], [New08] et [New10].

⁹[Hee92].

¹⁰[Amp22a, p. 60], [Amp22c, note sur p. 200], [Amp22b, note sur p. 237], [Amp85b, note sur p. 239], [Amp85a, note sur p. 192], [Blo82, p. 78], [Cha09, section 1.3], [AC11, section 1.4] et [AC15, section 1.4].

Des forces non électrostatiques sont nécessaires pour maintenir un ensemble de corps électrisés au repos les uns par rapport aux autres, dans un équilibre stable. Des forces non électrostatiques sont également nécessaires pour séparer des particules électrisées de manière opposée, comme dans l'effet de l'ambre. Elles sont également nécessaires dans les circuits résistifs transportant des courants constants,¹¹ et dans plusieurs autres situations. Ce chapitre présente certains phénomènes qui nécessitent l'existence de ces forces d'origine non électrostatique.

14.2 Forces non électrostatiques dans les configurations d'équilibre stable

Samuel Earnshaw (1805–1888) a prouvé en 1842 qu'il est impossible pour un ensemble de corps de rester au repos les uns par rapport aux autres, en équilibre stable, lorsque les seules forces agissant entre eux sont centrales et varient comme l'inverse du carré de leurs distances.¹² Dans la nature, en revanche, il existe plusieurs systèmes dans lesquels les corps électrisés en interaction restent au repos les uns par rapport aux autres, en équilibre stable. Par conséquent, dans toutes ces situations, des forces d'origine non électrostatique sont nécessaires pour équilibrer les forces électrostatiques et assurer la stabilité du système.¹³

Supposons un conducteur sphérique C chargé négativement et isolé du sol. Il peut avoir été chargé, par exemple, en raclant une règle en plastique sur sa surface. Ou par la méthode *ACR*, en touchant une paille frottée. Les charges sur le conducteur se repoussent mutuellement. En équilibre, elles restent uniformément réparties sur sa surface, figure 14.1.

Considérons la particule chargée négativement située au sommet de la sphère. Elle est repoussée par toutes les autres particules chargées négativement. Elle subit donc une force électrostatique verticale F_E dirigée vers l'extérieur du centre de la sphère. Une force d'origine non électrostatique dirigée vers le bas, F_{NE} , de même intensité que la force ascendante F_E , est nécessaire pour maintenir cette particule négative au repos à la surface de la sphère. Dans cette situation spécifique, cette force non électrostatique est parfois appelée « force de contact ». Mais son origine n'est pas clairement comprise. Nous ne savons pas non plus comment elle est produite, etc.

Heilbron a mentionné la question épineuse de l'agent qui empêche les fluides électriques de s'échapper de la surface des conducteurs.¹⁴

La même situation se produit lorsque la sphère conductrice est chargée positivement, figure 14.2 (a). Le même raisonnement est aussi valable pour une sphère isolante uniformément électrisée, négativement ou positivement, figures 14.2 (b) et (c).

Dans cette figure, F_E représente la force électrostatique nette agissant sur la particule électrisée supérieure et due à la répulsion électrostatique exercée par les autres

¹¹ [AH07], [AH09] et [AH13].

¹² [Ear42], [Max54a, article 116, pp. 174–176] et [Sco59].

¹³ Voir [VF80], [CS02, section 18.7], [AH07, section 5.3 et annexe A], [AH09, section 5.3 et annexe A], [AH13, section 5.3 et annexe A], [AC11, section 2.4], [AC15, section 2.4], ainsi que les sections 7.8 et 7.9 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

¹⁴ [Hei99, pp. 499–500].

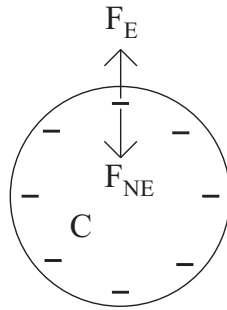


FIG. 14.1 : Un conducteur sphérique C uniformément électrisé. Nous montrons la force électrostatique répulsive nette F_E agissant sur la charge négative supérieure, due à toutes les autres charges négatives, et la force d'origine non électrostatique, F_{NE} , responsable du maintien de cette charge supérieure au repos à la surface de la sphère.

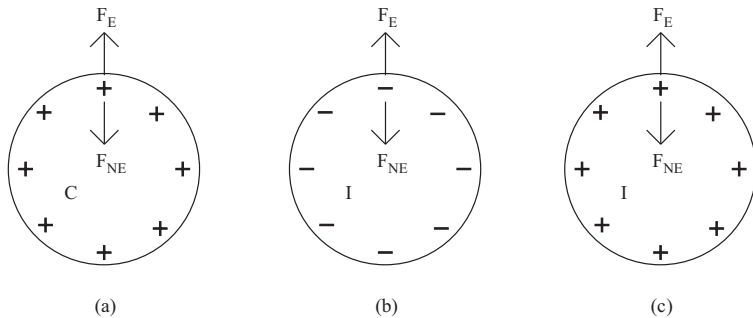


FIG. 14.2 : (a) Sphère conductrice C chargée positivement. (b) Sphère isolante I chargée négativement. (c) Sphère isolante I chargée positivement.

particules électrisées à la surface de la sphère où elle se trouve. Nous avons représenté par F_{NE} la force d'origine non électrostatique agissant sur la particule électrisée supérieure et la maintenant au repos à la surface de la sphère. Lorsque la sphère électrisée est en équilibre, F_{NE} a la même intensité que F_E , mais pointe dans la direction opposée.

Une autre configuration d'équilibre stable se produit lorsqu'un conducteur, isolé du sol, est polarisé en raison de la présence d'un corps électrisé à proximité. Supposons qu'une paille soit chargée négativement après avoir été frottée dans des cheveux. Approchez-la d'un conducteur isolé. Le conducteur est polarisé par la paille électrisée, figure 14.3.

Dans la figure 14.3, nous avons représenté par F_E la force électrostatique nette agissant sur la particule chargée positivement située à l'extrémité gauche du conducteur. Elle est due à l'attraction exercée par les charges négatives de la paille, ainsi qu'aux forces électrostatiques exercées sur cette particule par toutes les autres

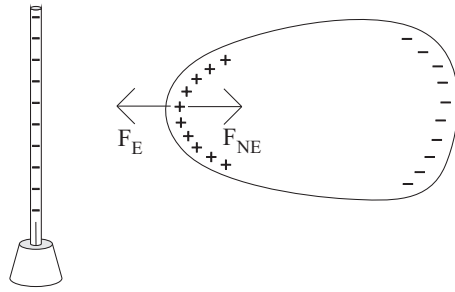


FIG. 14.3 : Conducteur polarisé par une paille chargée négativement située à proximité.

particules chargées à la surface de ce conducteur. En équilibre, cette particule reste au repos. Cet équilibre ne peut avoir lieu qu'en présence d'une autre force agissant sur cette particule positive, à savoir une force d'origine non électrostatique représentée ici par F_{NE} . En équilibre, ces deux forces ont la même intensité, mais pointent dans des directions opposées.

Considérons maintenant un isolant situé à proximité d'une paille chargée négativement. Chaque molécule de l'isolant se polarise, devenant positive dans la région proche de la paille et négative dans la région éloignée de la paille, figure 14.4 (a).

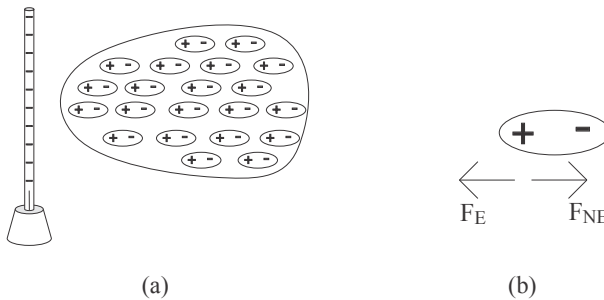


FIG. 14.4 : (a) Isolant polarisé par une paille négative à proximité. (b) Forces électrostatiques et non électrostatiques, F_E et F_{NE} , agissant sur l'extrémité positive d'une molécule polarisée spécifique de l'isolant.

Dans la figure 14.4 (b), nous avons considéré une seule molécule de cet isolant polarisé, située à son extrémité gauche, la plus proche de la paille. Nous avons représenté par F_E et F_{NE} les forces électrostatiques et non électrostatiques nettes, respectivement, agissant sur l'extrémité positive de cette molécule polarisée. La force électrostatique est exercée par les charges négatives de la paille, par l'extrémité négative de cette molécule, ainsi que par toutes les autres molécules polarisées de cet isolant. La force électrostatique nette F_E pointe vers la paille négative. En équilibre, l'extrémité positive de cette molécule reste au repos. Par conséquent, afin d'équilibrer F_E , nous avons besoin d'une force d'origine non électrostatique, F_{NE} . À l'équilibre, les deux

forces ont la même intensité, mais pointent dans des directions opposées.

Autrement dit, afin d'empêcher le mouvement des particules électrisées dans des corps tels que ceux des figures 14.1 et 14.2, nous avons besoin de forces non électrostatiques s'opposant à la force de Coulomb. Nous avons également besoin de forces non électrostatiques pour les conducteurs ou les isolants qui sont polarisés en raison de la présence de corps électrisés à proximité, comme dans les figures 14.3 et 14.4. Sans la présence de ces forces non électrostatiques, il serait impossible de maintenir des corps électrisés et/ou polarisés dans des configurations d'équilibre stable.

Il existe quelques situations dans lesquelles aucune force électrostatique nette n'agit sur toutes les particules d'un système de charges. Nous illustrons un exemple dans la figure 14.5.

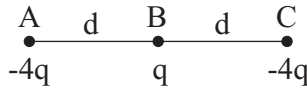


FIG. 14.5 : Les particules A , B et C sont séparées par une distance d le long de la ligne droite qui les relie. Les particules A et C sont chargées d'une charge $-4q$, tandis que la particule B est chargée d'une charge q .

Supposons trois particules ponctuelles A , B et C séparées par une distance d le long d'une ligne droite. Les particules A et C sont électrisées de manière égale avec une charge $-4q$, tandis que la particule B est électrisée avec une charge q . Les forces électrostatiques agissant sur ces particules sont représentées dans la figure 14.6.

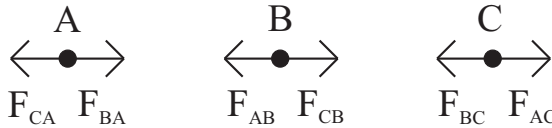


FIG. 14.6 : Forces électrostatiques agissant sur les particules.

La partie gauche de la figure 14.6 montre la force répulsive F_{CA} exercée par C sur A et la force attractive F_{BA} exercée par B sur A . Selon la loi de Coulomb, ces deux forces s'annulent mutuellement. Le centre de la figure 14.6 présente la force d'attraction F_{AB} exercée par A sur B et la force d'attraction F_{CB} exercée par C sur B . Selon la loi de Coulomb, ces deux forces s'annulent mutuellement. La partie droite de la figure 14.6 illustre la force d'attraction F_{BC} exercée par B sur C et la force de répulsion F_{AC} exercée par A sur C . Une fois de plus, selon la loi de Coulomb, ces deux forces s'annulent mutuellement.

En principe, ces trois particules pourraient rester au repos dans un référentiel inertiel, car aucune force nette n'agit sur chacune d'elles, figure 14.6. Il pourrait donc sembler que les forces non électrostatiques ne soient pas nécessaires dans ce cas. Cependant, l'équilibre de ce système est instable. Ce fait peut être illustré par la figure 14.7 dans laquelle la particule B a été légèrement déplacée vers la droite, plus près de C que de A .

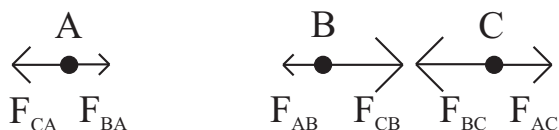


FIG. 14.7 : Les forces électrostatiques agissant sur les particules lorsque B se rapproche de C .

Lorsque la particule B se rapproche de C pour une raison quelconque, la force d'attraction entre elles augmente en intensité. De même, la force d'attraction entre A et B diminue en intensité, en raison de la plus grande distance entre ces particules. Par conséquent, la force nette agissant sur B pointe désormais vers C . Pour la même raison, la force nette agissant sur C pointe vers B . La force nette agissant sur A pointe désormais vers la gauche, c'est-à-dire loin du couple BC . Supposons que ces particules soient libres de se déplacer sous l'action de ces forces électriques qui agissent sur elles, en commençant par la configuration de la figure 14.6. Si une perturbation externe fait légèrement se déplacer B vers C , ces deux particules commenceront à se rapprocher l'une de l'autre. La particule A , en revanche, s'éloignera de la paire BC . Ce système de particules s'éloignera alors de la configuration initiale d'équilibre.

Autrement dit, bien que la configuration de la figure 14.5 représente un équilibre, celui-ci est instable. Toute perturbation dans ce système le brisera. Cet exemple illustre le théorème d'Earnshaw. Par conséquent, afin de maintenir ce système de trois particules en équilibre stable, nous avons à nouveau besoin de forces d'origine non électrostatique.

Le chlorure de sodium ou sel de cuisine est un composé ionique typique en équilibre stable. Il possède une structure cristalline cubique composée d'ions sodium et chlorure, Na^+ et Cl^- . Des forces non électrostatiques sont nécessaires pour équilibrer les forces coulombiennes agissant sur les ions.

14.3 Forces non électrostatiques dans l'effet de l'ambre

Des forces d'origine non électrostatique sont également nécessaires pour séparer des particules de charges opposées, comme dans l'effet de l'ambre. Avant d'examiner cet effet, rappelons l'action de la force de Coulomb sur des corps de charges opposées.

Supposons un conducteur C_1 chargé positivement avec une charge $+Q$, isolé du sol, et un autre conducteur C_2 chargé négativement avec une charge $-Q$, également isolé. Lorsqu'ils se touchent, les deux conducteurs sont neutralisés. Ils restent neutres après séparation, figure 14.8.

Une expérience de ce type a été réalisée dans le volume 1 de cet ouvrage.¹⁵ Elle utilisait deux électroscopes chargés de manière opposée, figure 14.9.

Supposons maintenant un isolant I électrisé à sa surface, comme une paille électrisée négativement après avoir été frottée dans des cheveux ou avec une serviette

¹⁵Section 6.9 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

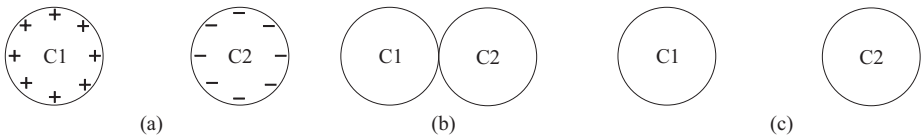


FIG. 14.8 : (a) Sphères conductrices C_1 et C_2 séparées l'une de l'autre et chargées électriquement de manière opposée. (b) Neutralisation des deux sphères lorsqu'elles se touchent. (c) Les sphères restent neutres après séparation.

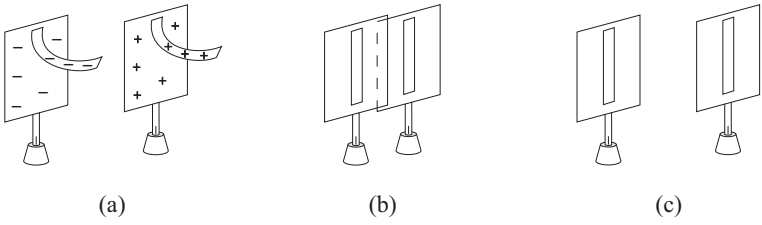


FIG. 14.9 : (a) Un électroscope positif et un électroscope négatif. (b) Après contact, les bandes tombent. (c) Après séparation, les bandes restent verticales, indiquant que les électroscopes sont désormais déchargés.

en papier. Le volume 1 de cet ouvrage a montré que l'une des procédures permettant de neutraliser cet isolant consiste à le plonger dans de l'eau douce placée dans un bol métallique mis à la terre. Une fois l'eau retirée, l'isolant est neutralisé. Autrement dit, il n'attire plus les morceaux de papier à proximité.¹⁶ La figure 14.10 illustre cette procédure.

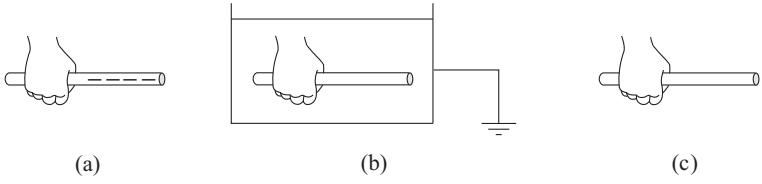


FIG. 14.10 : (a) Une paille en plastique est chargée négativement. (b) Elle est plongée dans de l'eau douce placée dans un bol métallique relié à la terre. (c) Elle est neutre lorsqu'elle est retirée de l'eau.

L'eau se comporte comme un conducteur dans les expériences électrostatiques. Elle contient des particules électrisées libres (ions chargés, H_3O^+ , OH^- et de nombreuses autres impuretés électrisées) qui peuvent se déplacer dans l'eau. Lorsque toutes les parties de la paille électrisée entrent en contact avec l'eau environnante, la paille est neutralisée. Les charges qui étaient réparties à sa surface sont désormais réparties dans le liquide. Comme l'eau utilisée dans cette expérience est mise à la terre, ces

¹⁶Section 7.14 de [Ass10b], [Ass10a], [Ass11], [Ass15b] et [Ass17].

charges nettes sont alors réparties sur toute la Terre. Lorsque la paille sort de l'eau, observez qu'elle est neutre. Elle n'est plus capable d'attirer les petits morceaux de papier qui s'en approchent.

Cette procédure montre que pour neutraliser un isolant électrisé sur toute sa surface, vous pouvez le plonger dans un conducteur tel que l'eau, mettant ainsi à la terre tous les points situés à la surface de l'isolant.

Supposons maintenant deux corps isolants A et B électrisés avec des charges opposées $+Q$ et $-Q$ réparties sur leurs surfaces. Ces charges ne sont pas libres de se déplacer le long de ces corps, car ce sont des isolants. Par conséquent, pour les neutraliser, il faudrait mettre en contact tous leurs points de charge opposée. Ce qui va être décrit maintenant est une supposition de ce qui pourrait se passer dans cette situation idéale. La figure 14.11 illustre qualitativement ce processus hypothétique de neutralisation de deux isolants électrisés de manière opposée avec des charges réparties sur leurs surfaces. Nous n'avons pas réalisé d'expériences réelles dans lesquelles nous avons réussi à obtenir la neutralisation de ces deux corps par le processus décrit dans la figure 14.11.

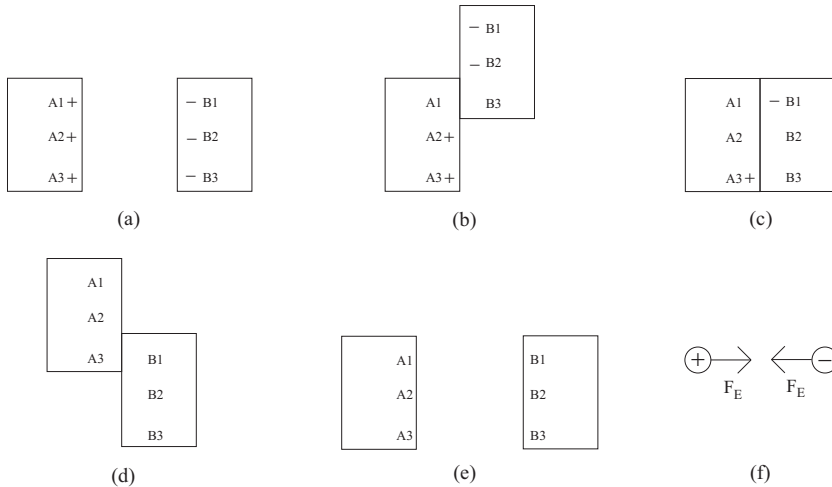


FIG. 14.11 : (a) Neutralisation hypothétique de deux isolants A et B électrisés de manière opposée. (b) Neutralisation des points A_1 et B_3 lors de leur contact. (c) Neutralisation des points A_2 et B_2 lors de leur contact. (d) Neutralisation des points A_3 et B_1 lors de leur contact. (e) Les isolants restent neutres après séparation. (f) Forces d'attraction électrostatiques, F_E , agissant entre des particules électrisées de manière opposée.

La figure 14.11 (a) montre l'isolant A avec trois charges positives situées aux points A_1 , A_2 et A_3 de sa surface, tandis que l'isolant B a trois charges négatives situées aux points B_1 , B_2 et B_3 de sa surface. Dans (b), les points A_1 et B_3 se touchent, neutralisant ces points. Dans (c), les points A_2 et B_2 se touchent, neutralisant ces points. Dans (d), les points A_3 et B_1 se touchent, neutralisant ces points. Nous obtenons deux isolants neutres lorsqu'ils sont séparés l'un de l'autre, figure 14.11 (e). La

figure 14.11 (f) présente la force électrostatique F_E qui attire les particules de charges opposées lorsqu'elles sont proches l'une de l'autre.

Nous allons maintenant examiner l'effet de l'ambre. La séparation des charges qui se produit dans cet effet s'oppose à l'action de la force de Coulomb.

Dans l'effet de l'ambre, ce qui se produit est exactement le contraire du processus représenté dans la figure 14.11. Supposons deux isolants A et B faits de matériaux différents et initialement neutres. Frottez-les vigoureusement l'un contre l'autre avec une vitesse relative V . Après séparation, l'un d'eux devient chargé positivement avec une charge $+Q$, tandis que l'autre isolant devient chargé négativement avec une charge $-Q$. La figure 14.12 illustre l'effet de l'ambre.

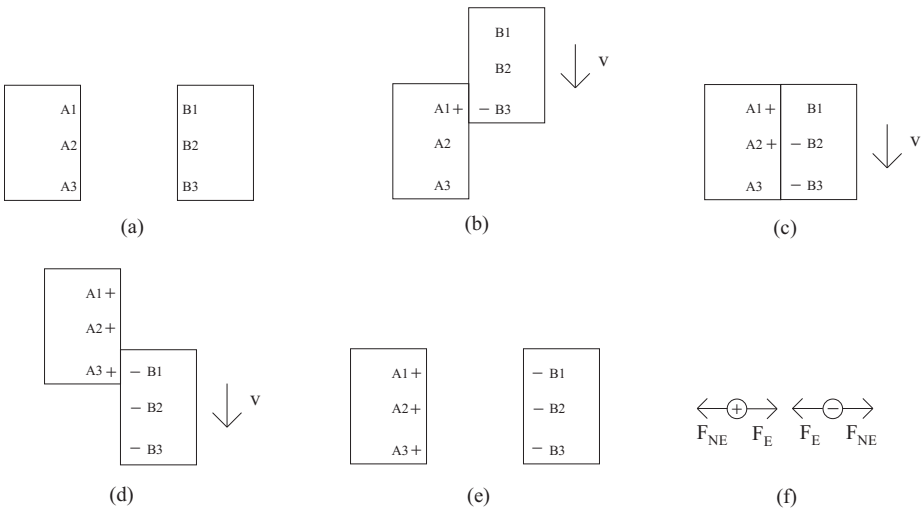


FIG. 14.12 : Représentation qualitative de l'effet de l'ambre. (a) Deux isolants A et B initialement neutres. De (b) à (d) : en raison du frottement entre les surfaces en interaction, ces deux corps s'électrifient avec des charges opposées. (e) Situation finale avec les deux isolants chargés de manière opposée. (f) Forces d'attraction électrostatiques, F_E , agissant entre des particules chargées de manière opposée, ainsi que les forces d'origine non électrostatique, F_{NE} , agissant entre elles. Ces forces d'origine non électrostatique sont responsables de la séparation des charges dans les situations (b) à (d).

Il n'y a pas de forces électrostatiques entre deux particules neutres, tandis que deux particules chargées de manière opposée s'attirent mutuellement avec une force d'origine électrostatique, F_E . Dans l'effet de l'ambre, nous commençons avec deux isolants neutres et nous terminons avec deux corps chargés de manière opposée. Par conséquent, cette séparation des charges opposées ne peut se produire que par l'action d'une force d'origine non électrostatique, F_{NE} , agissant entre les particules de charges opposées pendant qu'elles sont séparées les unes des autres. Cette force F_{NE} tente de séparer les particules de charges opposées, tandis que la force électrostatique F_E tente

de les unir. Ces deux types de force sont représentés dans la figure 14.12 (f). De plus, l'amplitude de F_{NE} doit être supérieure à celle de F_E pendant que ces particules de charges opposées sont séparées lors du frottement dans l'effet de l'ambre.

En conclusion, les forces électrostatiques pourraient expliquer la neutralisation hypothétique des isolants électrisés de manière opposée représentés dans la figure 14.11. Cependant, ces forces électrostatiques agissant seules ne pourraient pas expliquer l'effet de l'ambre. Après tout, nous commençons avec deux isolants neutres et nous finissons avec des isolants chargés de manière opposée, figure 14.12.

Par conséquent, l'effet de l'ambre nécessite l'existence de forces d'origine non électrostatique, F_{NE} . Le phénomène le plus ancien et le plus simple de l'électricité nécessite l'existence de ces forces, sinon il ne pourrait pas avoir lieu.

14.3.1 Autres mystères dans l'effet de l'ambre

Bien que l'effet de l'ambre soit le phénomène le plus ancien étudié en électricité, plusieurs mystères l'entourent encore. Nous ne connaissons pas exactement l'origine de la force non électrostatique qui provoque la séparation des charges lorsque deux substances différentes sont frottées l'une contre l'autre. Nous ne connaissons pas non plus l'origine de la force non électrostatique qui maintient les charges au repos à la surface des corps électrisés ou polarisés. D'autres aspects de cet effet restent également mystérieux.

La plupart des manuels scolaires affirment qu'il y a un transfert d'électrons entre les deux corps de nature différente qui sont frottés dans l'effet de l'ambre, l'un recevant des électrons et l'autre perdant ces particules fondamentales. Cependant, même si l'électrisation est due à un transfert d'électrons, le mécanisme responsable de cet échange de particules qui se produit contre la force de Coulomb n'est pas du tout clair.

De plus, l'effet de l'ambre (ou la triboélectrisation en général) est-il vraiment dû à un transfert d'électrons ? Cette affirmation apparaît dans les manuels scolaires comme une déclaration générale, sans qu'aucune expérience à l'appui ne soit citée.

Cependant, lorsque nous lisons la littérature spécialisée écrite par des scientifiques qui mènent réellement des expériences sur ce sujet, nous nous rendons compte qu'il existe encore de nombreux doutes et incertitudes concernant le processus fondamental d'électrisation qui se produit dans l'effet de l'ambre. W. R. Harper, dans son ouvrage de 1965 intitulé *Contact and Frictional Electrification*, a par exemple déclaré ce qui suit :^{17, 18}

Une question cruciale pour expliquer la production de charge statique est de savoir si la charge des isolants provient d'un transfert d'électrons, d'ions ou des deux. Montgomery dirait que les porteurs de charge sont *toujours* des électrons et Loeb qu'ils sont *généralement* des électrons : Henry estime que la question reste ouverte. Je suis d'avis qu'une réponse définitive peut désormais être donnée, à

¹⁷Cité dans [Bai01] et [Gal14].

¹⁸A crucial question for the explanation of the production of static charge is whether the charging of insulators comes from a transfer of electrons, of ions, or of both. Montgomery would say that the carriers of charge are *always* electrons and Loeb that they are *generally* electrons : Henry feels that the question is still an open one. I am of the opinion that a definite answer can now be given which is that the carriers are *never* electrons—when the material being charged is strictly an insulator.

savoir que les porteurs ne sont *jamais* des électrons, lorsque le matériau chargé est strictement un isolant.

Je ne connais pas la réponse à cette question. Je me contenterai de citer ici quelques références traitant de ce sujet d'un point de vue expérimental.¹⁹

14.4 Forces non électrostatiques agissant à l'intérieur d'une batterie

En 1800, Volta a publié son invention de la pile électrique ou batterie.²⁰ Il a disposé des disques dans l'ordre suivant, de bas en haut : argent, zinc, disque de carton humidifié ; argent, zinc, disque de carton humidifié ; argent, zinc, disque de carton humidifié ; etc. En reliant l'argent inférieur au zinc supérieur à l'aide d'un fil métallique, il a observé qu'un courant constant circulait dans le fil.

La figure 14.13 illustre schématiquement la pile chimique ou batterie.

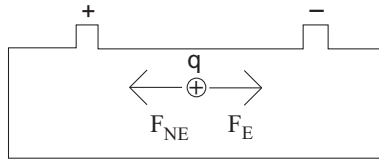


FIG. 14.13 : Batterie chargée contenant un ion positif et mobile q .

La batterie possède une borne positive + et une borne négative -. Nous avons également dessiné une particule électrisée avec une charge q à l'intérieur de la batterie. Elle représente un ion qui peut se déplacer à l'intérieur de la batterie, c'est-à-dire une particule électrisée mobile. Supposons que q soit positive. Il existe alors une force électrostatique F_E qui agit sur elle et qui pointe de la borne positive vers la borne négative. Cette force électrostatique tend à décharger la batterie. Autrement dit, si elle agissait seule, la particule positive q se déplacerait vers la borne négative de la batterie, la neutralisant. Cependant, il est possible de garder une batterie chargée pendant plusieurs jours lorsque ses bornes ne sont pas reliées par un fil métallique. Par conséquent, dans cette situation d'équilibre où la batterie reste électrisée, malgré la présence d'ions mobiles à l'intérieur, une force d'origine non électrostatique, F_{NE} , est nécessaire. Lorsqu'aucun courant ne circule dans la batterie, ces deux forces agissant simultanément sur l'ion, F_E et F_{NE} , ont la même intensité mais pointent dans des directions opposées, figure 14.13.

Il existe une autre situation qui montre la nécessité d'une force d'origine non électrostatique à l'intérieur d'une batterie, à savoir lorsqu'elle est en cours de charge ou d'électrisation. Placez de l'acide sulfurique dilué dans un récipient isolant. Cet acide est électriquement neutre dans son ensemble, bien qu'il contienne de nombreux ions mobiles positifs et négatifs. Considérons deux lamelles ou plaques neutres, l'une en

¹⁹ [Bai01], [Sch07], [MWW07], [MW08], [LB08], [LB09], [Wil12], [Gal14] et [GB17].

²⁰ [Vol00a], [Vol00b], [Vol64], [Mag06] et [MA08].

zinc et l'autre en cuivre. La plaque de zinc est partiellement plongée dans l'acide à une extrémité du récipient, tandis que la plaque de cuivre est partiellement plongée à l'autre extrémité. Ce processus simple électrise ces deux plaques de manière opposée. Le zinc devient négativement électrisé, tandis que le cuivre devient positivement électrisé. Cette séparation des charges ne peut avoir lieu que grâce à l'action d'une force non électrostatique. Après tout, les forces électrostatiques ont tendance à neutraliser les corps chargés de manière opposée. Dans cet exemple particulier, en revanche, nous partons de deux corps différents, le zinc et le cuivre, initialement neutres. À la fin du processus, l'un d'eux est chargé positivement, tandis que l'autre est chargé négativement. Ce mécanisme de charge ne s'intensifie pas indéfiniment. Nous atteignons une valeur de saturation dans laquelle il existe une différence de potentiel constante entre les plaques de zinc et de cuivre. Pendant l'intervalle de temps au cours duquel la différence de potentiel est passée de zéro à cette valeur de saturation, la force d'origine non électrostatique séparant les charges opposées avait une magnitude supérieure à la force électrostatique tendant à les unir.

Par conséquent, des forces d'origine non électrostatique agissent également dans les réactions chimiques qui se produisent au niveau des électrodes d'une pile électrique ou d'une batterie.

14.5 Forces non électrostatiques dans les circuits transportant des courants continus

Lorsqu'un fil métallique résistif est connecté aux deux bornes d'une batterie, un courant électrique constant circule dans le circuit fermé, comme indiqué dans la section 3.4. Selon la loi d'Ohm, la tension ou la différence de potentiel entre les extrémités du fil est proportionnelle à sa résistance et au courant électrique qui le traverse. Cette loi peut également être exprimée de manière microscopique. Un métal possède des électrons libres qui peuvent se déplacer par rapport au réseau cristallin du métal. Selon la version microscopique de la loi d'Ohm, la force électrique agissant sur un électron libre mobile est équilibrée par une force résistive lorsqu'un courant constant circule dans le circuit. Cette force résistive est proportionnelle à la vitesse de l'électron de conduction par rapport au réseau cristallin du métal. Les forces électrique et résistive agissent dans des directions opposées. Elles ont la même intensité lorsqu'un courant constant circule dans le circuit.

La force électrique est due à la loi de Coulomb. Elle agit sur tout électron libre, étant exercée par une distribution de charges situées à la surface du fil résistif. La densité superficielle de ces charges varie sur la longueur du fil résistif, bien qu'elle soit constante dans le temps pour les courants stables. La force électrique propulse l'électron libre, créant ainsi le courant électrique.

La force résistive agissant sur tout électron libre, en revanche, a une origine non électrostatique. Elle est proportionnelle à la vitesse de dérive de l'électron par rapport au réseau cristallin du métal. L'intensité de cette force augmente lorsque la vitesse de l'électron libre augmente. Peu de temps après la connexion du fil à la batterie, l'électron libre atteint une vitesse constante. Dans cette situation stable, la force de

résistance a la même amplitude que la force électrique, ces deux forces agissant dans des directions opposées. Cette force de résistance empêche l'accélération indéfinie de l'électron libre exercée par la force électrique.

Il existe également une force d'origine non électrostatique agissant sur les charges négatives mobiles situées à l'intérieur de la batterie. Elle les propulse de la borne positive de la batterie vers la borne négative. La force électrostatique agissant sur une particule négative située à l'intérieur de la batterie, en revanche, pointe de la borne négative vers la borne positive.

Ces sujets ont été abordés en détail dans notre ouvrage intitulé *The Electric Force of a Current: Weber and the Surface Charges of Resistive Conductors Carrying Steady Currents*.²¹

14.6 Forces non électrostatiques dans d'autres situations

Il existe plusieurs autres mécanismes dans lesquels nous commençons avec deux corps neutres A et B , pour finir avec A électrisé positivement et B électrisé négativement. Il existe également de nombreuses autres procédures dans lesquelles nous commençons avec un seul corps neutre isolé du sol, pour finir avec ce corps polarisé électriquement, c'est-à-dire avec un côté positif et un autre côté négatif. Des forces non électrostatiques sont nécessaires dans tous ces mécanismes. Nous énumérons ci-dessous quelques-uns de ces processus :

- Lorsque deux métaux différents sont mis en contact, l'un d'eux devient chargé positivement et l'autre négativement, avec une différence de potentiel entre eux. Cet effet est déterminé par les différences de fonction de travail entre les métaux. C'est ce qu'on appelle l'« effet Volta », la « différence de potentiel de Volta », la « différence de potentiel externe » ou la « différence de potentiel de contact ».²²
- L'électrisation par contact (ou tension de contact) en général.²³ Au chapitre 5, par exemple, nous avons abordé l'électrisation des rubans adhésifs.
- L'électrisation par réactions chimiques. Plusieurs processus différents sont étudiés en électrochimie.
- L'effet thermoélectrique, c'est-à-dire la conversion directe des différences de température en tension électrique. Un dispositif thermoélectrique crée une différence de potentiel entre deux côtés lorsqu'il y a une différence de température entre chacun d'eux.
- L'effet pyroélectrique, à ne pas confondre avec la thermoélectricité. Certains cristaux génèrent une tension temporaire lorsqu'ils sont chauffés ou refroidis. Lorsque l'ensemble du matériau passe d'une température à une autre, une tension temporaire apparaît à travers le cristal.

²¹[AH07], [AH09] et [AH13].

²²[Whi73a, pp. 71–73] et [Whi73b, pp. 90 et 235].

²³[Jef59].

- L'effet piézoélectrique, c'est-à-dire la production d'une différence de potentiel entre deux faces d'un matériau lorsqu'il est comprimé ou déformé mécaniquement.
- L'électrisation par pression, à ne pas confondre avec la piézoélectricité.²⁴
- L'effet photoélectrique, c'est-à-dire l'émission d'électrons par un matériau lorsqu'une lumière d'une fréquence suffisamment élevée, qui dépend de la substance, est projetée sur le matériau.
- La production d'électrets. Ils peuvent être monopolaires (avec une charge totale différente de zéro) ou dipolaires (avec une charge totale nulle, mais avec un moment dipolaire permanent). Des forces d'origine non électrostatique sont nécessaires pour séparer ces charges et produire les électrets.²⁵
- Des forces non électrostatiques sont nécessaires non seulement pour produire des électrets, mais aussi pour maintenir leur électrisation après leur production. Ces forces sont nécessaires pour empêcher leur décharge ou leur neutralisation.
- Etc.

Dans tous ces cas, nous avons besoin d'une force d'origine non électrostatique pour produire la polarisation d'un corps initialement neutre, un côté de ce corps devenant positif et l'autre négatif. Une force d'origine non électrostatique est également nécessaire pour produire la séparation des charges entre deux corps initialement neutres, l'un de ces corps devenant positif et l'autre négatif. Nous avons également besoin d'une force d'origine non électrostatique pour induire un courant le long d'un circuit résistif fermé, comme un anneau.

14.7 Origines des forces non électrostatiques

Nous pensons que l'origine des forces non électrostatiques mentionnées dans les sections 14.2 à 14.6 n'est pas bien connue. Ces forces doivent exister pour produire ces phénomènes. D'autre part, à notre avis, de nombreux aspects liés à ces forces n'ont pas encore été clarifiés dans de nombreuses situations : leurs origines, leurs expressions mathématiques, leurs propriétés et les grandeurs dont elles dépendent. Ce manque de connaissances complètes se produit même dans le phénomène le plus ancien de l'électrostatique, à savoir l'effet de l'ambre. On ne sait pas encore très bien ce qui provoque la séparation des charges lorsque deux corps sont frottés l'un contre l'autre. De même, le mécanisme responsable de la séparation des charges en l'absence de frottement, comme dans l'électrisation par contact de deux matériaux différents, n'a pas été complètement expliqué. Il est possible que le mécanisme à l'œuvre dans l'électrisation (due au contact ou au frottement) de deux types de métaux (comme le cuivre et le zinc) soit différent du mécanisme à l'œuvre dans l'électrisation mutuelle d'un conducteur et d'un isolant (comme le cuivre et le plastique), ou du mécanisme à

²⁴ [Kat06, pp. 15 et 239–246], [BW11] et [WB11].

²⁵ [Net94], [Sil10b], [Sil10a], [Bos11, chapitre 8, pp. 226–248] et [BAC12, chapitre 19, pp. 373–392].

l'œuvre dans l'électrisation mutuelle de deux types d'isolants (comme le plastique et le caoutchouc).

Il existe cependant certains cas où nous avons une bonne connaissance des origines et des propriétés de ces forces non électrostatiques. Nous citons ici quelques exemples :

- Lorsqu'un conducteur ouvert, comme une barre métallique, se déplace par rapport à un aimant permanent, le conducteur peut se polariser (positif à une extrémité et négatif à l'autre). Le même effet peut également se produire lorsque le conducteur ouvert se déplace par rapport à un circuit fermé transportant un courant constant.
- Lorsqu'un conducteur fermé, tel qu'un anneau, se déplace par rapport à un aimant permanent, un courant électrique peut être induit dans l'anneau. Le même effet peut également se produire lorsque l'anneau se déplace par rapport à un autre circuit fermé transportant un courant constant.
- Supposons maintenant un conducteur ouvert, tel qu'une barre métallique, au repos par rapport à un circuit fermé proche. Lorsqu'un courant variable circule dans le circuit, le conducteur peut se polariser.
- Supposons maintenant un conducteur fermé, tel qu'un anneau, au repos par rapport à un circuit fermé proche. Lorsqu'un courant variable circule dans le circuit, un courant peut être induit dans l'anneau.

Il existe des situations plus générales dans lesquelles nous disposons d'expressions mathématiques décrivant des forces non électrostatiques, à savoir :

- La force entre deux aimants.
- La force entre deux conducteurs transportant des courants constants.
- La force entre un aimant et un conducteur transportant un courant constant.
- La force entre un aimant et une particule électrisée qui est en mouvement par rapport à l'aimant.
- La force entre un circuit fermé transportant un courant constant et une particule électrisée qui est en mouvement par rapport au circuit.
- La force entre un circuit fermé transportant un courant variant dans le temps et une particule électrisée qui est stationnaire ou en mouvement par rapport au circuit.
- La force entre deux particules électrisées se déplaçant l'une par rapport à l'autre.

Dans ces situations spécifiques, deux théories électromagnétiques principales expliquent les forces agissant entre les particules électrisées. Ces forces peuvent, par

exemple, polariser un conducteur initialement neutre isolé du sol. Elles peuvent également induire un courant dans un anneau métallique résistif. Ces deux théories décrivent les forces entre les particules électrisées non seulement lorsqu'elles sont au repos, mais aussi lorsqu'elles se déplacent les unes par rapport aux autres. Ce mouvement peut être une vitesse relative ou une accélération relative entre ces particules.

Les sous-sections suivantes présentent brièvement ces deux théories rivales.

14.7.1 Théorie de Faraday et Maxwell basée sur les champs électromagnétiques

La théorie électromagnétique qui apparaît dans la plupart des manuels scolaires a été développée par de nombreux auteurs, dont Michael Faraday, James Clerk Maxwell et Hendrik Antoon Lorentz (1853–1928).²⁶ Cette théorie suppose qu'une particule chargée en mouvement, appelée charge source, génère un champ électrique et un champ magnétique autour d'elle. Ces champs se propageraient dans l'espace, généralement à la vitesse de la lumière. Lorsqu'ils atteignent une autre particule chargée en mouvement, appelée charge d'essai, ces champs exerceraient une force électrique et une force magnétique sur cette charge d'essai. L'un des grands problèmes de cette théorie est de comprendre la signification de ces champs électromagnétiques. En général, ce sujet n'est pas abordé dans les manuels scolaires.

Faraday, Maxwell et la plupart des manuels scolaires présentent plusieurs définitions du concept de champ. Parfois, ils disent qu'il s'agit d'une région de l'espace autour de la charge source. Dans d'autres situations, ils affirment que ce champ se propage dans l'espace. Parfois, ils définissent le champ comme une grandeur vectorielle qui a à la fois une amplitude et une direction. Dans certains contextes, ils mentionnent que ces champs transportent un moment linéaire et de l'énergie. Ils présentent également de nombreuses autres définitions et propriétés différentes du concept de champ.

Le problème est que ces différentes définitions se contredisent.²⁷ Par exemple, comment une région de l'espace peut-elle se propager dans l'espace? Comment une région de l'espace peut-elle avoir une amplitude et une direction? Le champ gravitationnel, le champ électrique et le champ magnétique ont des dimensions différentes. Par conséquent, ces trois grandeurs ne peuvent pas avoir le même nom, « champ », car elles sont de nature différente. Chacune de ces trois grandeurs devrait être classée dans une catégorie différente et recevoir un nom différent en fonction de la catégorie à laquelle elle appartient. Il existe de nombreuses autres contradictions entre ces différentes définitions du concept de champ, qui ne seront pas abordées ici.

L'expression mathématique de la force exercée par les champs électriques et magnétiques agissant sur une charge d'essai est essentiellement due aux travaux de Maxwell et Lorentz. Cette expression de la force est également problématique. Dans la force magnétique, en particulier, nous avons la vitesse de la charge d'essai. Cependant, la signification de cette vitesse change selon le scientifique qui présente cette force magnétique. La signification de cette vitesse est différente, par exemple, selon les scientifiques suivants : Maxwell, J. J. Thomson (1856–1940) et O. Heaviside

²⁶ [Far52], [Max54b] et [Lor95].

²⁷ Comme discuté dans la section 2.9 de [Ass13] et dans les sections 3.1 et 3.2 de [Ass14].

(1850–1925), Lorentz, A. Einstein (1879–1955), etc. Nous sommes alors perplexes ou désespérés. La vitesse \vec{v} apparaissant dans la force magnétique est alors la vitesse de la charge d’essai par rapport à quoi ? Normalement, les manuels scolaires n’abordent pas cette question. Cette absence de discussion est absurde. Après tout, nous ne pouvons appliquer cette force que lorsque nous comprenons le cadre de référence par rapport auquel cette vitesse doit être comprise. De plus, même lorsque ces manuels présentent cette vitesse, ils ne s’accordent pas entre eux quant à sa signification. Certains auteurs mentionnent qu’elle est relative au champ magnétique. D’autres auteurs mentionnent qu’elle doit être comprise par rapport à un référentiel inertiel. Certains auteurs disent qu’elle est relative au milieu dans lequel la charge d’essai se déplace. Dans d’autres situations, ils affirment qu’elle est relative au détecteur du champ magnétique. Certains auteurs mentionnent qu’elle est relative à la source du champ magnétique (comme un aimant ou un fil conducteur de courant). Etc. Nous avons discuté de la signification et de l’origine de la force magnétique agissant sur une charge d’essai dans un autre ouvrage et nous n’entrons pas dans les détails ici.²⁸

14.7.2 Électrodynamique de Weber basée sur l’interaction entre particules électrisées

Il existe une autre théorie qui explique ces phénomènes sans recourir aux concepts de champs électriques et magnétiques. Elle repose sur l’interaction directe entre particules électrisées. Il n’y a pas d’agent intermédiaire pour cette interaction.

Cette théorie repose essentiellement sur les idées développées par Isaac Newton, figure 7.12. Dans son ouvrage *Principia* de 1687, Newton a présenté sa loi de la gravitation universelle.²⁹ Selon Newton, la force entre deux particules est proportionnelle au produit de leurs masses, varie inversement au carré de leur distance, agit le long de la ligne droite reliant les particules et suit le principe d’action et de réaction.

Charles Augustin de Coulomb, figure 2.16, a obtenu une expression analogue décrivant l’interaction entre deux particules électrisées au repos l’une par rapport à l’autre, comme indiqué dans la section 14.1. Il a également obtenu une expression similaire décrivant la force entre les pôles magnétiques. C’est-à-dire une force proportionnelle au produit des intensités des pôles magnétiques, variant comme l’inverse du carré de leur distance, agissant le long de la ligne droite qui les relie et suivant le principe d’action et de réaction.³⁰

Ørsted a publié en 1820 sa célèbre expérience décrivant la déviation d’une aiguille aimantée sous l’action d’un fil droit voisin transportant un courant continu, comme mentionné dans la section 3.4. André-Marie Ampère, figure 14.14, a été fortement influencé par la découverte d’Ørsted.

Entre 1820 et 1827, Ampère a réalisé de nombreuses expériences et recherches théoriques démontrant pour la première fois l’existence de forces et de couples entre des fils conducteurs de courant. De plus, afin d’expliquer la découverte d’Ørsted, il a supposé l’existence de courants électriques microscopiques à l’intérieur des aimants.

²⁸Voir la section 14.5 de [Ass13] et la section 15.5 de [Ass14].

²⁹[New90a], [New34], [New90], [New08] et [New10].

³⁰Section 2.5 de [Ass13] et [Ass14].



FIG. 14.14 : André-Marie Ampère (1775–1836).

Il a obtenu une expression extrêmement importante donnant la force entre deux éléments de courant. Cette force agit le long de la ligne droite reliant les éléments, est proportionnelle au produit des intensités de courant, varie comme l'inverse du carré de leur distance et suit le principe d'action et de réaction. Maxwell considèrerait la force d'Ampère entre les éléments conducteurs comme la formule cardinale de l'électrodynamique, c'est-à-dire son résultat le plus important :^{31,32}

L'étude expérimentale grâce à laquelle Ampère a établi les lois de l'action mécanique entre les courants électriques est l'une des réalisations les plus brillantes de la science. L'ensemble, théorie et expérience, semble avoir jailli, tout prêt et tout armé, du cerveau du «Newton de l'électricité». Elle est parfaite dans sa forme, d'une précision irréprochable, et se résume en une formule à partir de laquelle tous les phénomènes peuvent être déduits, et qui restera à jamais la formule cardinale de l'électrodynamique.

Malheureusement, la force d'Ampère entre les éléments de courant n'apparaît pas dans la plupart des manuels modernes traitant de l'électromagnétisme, car elle est inconnue de la plupart des scientifiques. Ces manuels ne présentent que la force entre les éléments de courant due à H. G. Grassmann (1809–1877). Cette force est basée sur les travaux de J.-B. Biot (1774–1862) et F. Savart (1791–1841). Maxwell connaissait la force de Grassmann. Il a comparé la force de Grassmann, la force d'Ampère et deux

³¹ [Max54b, article 528, p. 175].

³² The experimental investigation by which Ampère established the laws of the mechanical action between electric currents is one of the most brilliant achievements in science. The whole, theory and experiment, seems as if it had leaped, full grown and full armed, from the brain of the 'Newton of electricity.' It is perfect in form, and unassailable in accuracy, and it is summed up in a formula from which all the phenomena may be deduced, and which must always remain the cardinal formula of electro-dynamics.

autres expressions créées par Maxwell lui-même. Après avoir comparé ces quatre expressions, Maxwell est arrivé à la conclusion suivante :^{33,34}

527.] Parmi ces quatre hypothèses différentes, celle d'Ampère est sans aucun doute la meilleure, car c'est la seule qui rend les forces exercées sur les deux éléments non seulement égales et opposées, mais également alignées sur la ligne droite qui les relie.

En intégrant sa force entre deux éléments de courant autour de deux circuits fermés, associée à l'hypothèse de courants électriques microscopiques à l'intérieur des aimants et également à l'intérieur de la Terre, Ampère a réussi à expliquer quantitativement trois types de phénomènes, à savoir (I) le magnétisme (forces et couples entre aimants, ainsi que les couples et forces entre un aimant et la Terre), (II) l'électrodynamique (forces et couples entre les fils conducteurs de courant), et (III) l'électromagnétisme (forces et couples entre un aimant et un fil conducteur de courant, ainsi que les forces et couples entre la Terre et un fil conducteur de courant). En 1826, il publia son ouvrage principal sur ce sujet, disponible en français, en portugais et en anglais.³⁵

Les travaux de Newton, Coulomb et Ampère ont été développés par le physicien Wilhelm Eduard Weber (1804–1891), figure 14.15.

Les œuvres complètes de Weber ont été publiées en six volumes entre 1892 et 1894.³⁶ Il a écrit huit mémoires majeurs entre 1846 et 1878 sous le titre général *Elektrodynamische Maassbestimmungen (Mesures électrodynamiques)*.³⁷ Les principaux travaux de Coulomb, Ampère et Weber sont désormais disponibles en anglais et en portugais.³⁸

Weber a obtenu une force entre des particules électrisées qui dépend uniquement de la distance entre ces charges, de la vitesse radiale relative entre elles et de l'accélération radiale relative entre elles. Il s'agit d'une force centrale agissant le long de la ligne droite reliant ces deux particules et respectant le principe d'action et de réaction. Elle satisfait aux trois principes de conservation, à savoir l'impulsion linéaire, le moment cinétique et l'énergie. Avec l'électrodynamique de Weber, nous pouvons déduire la force de Coulomb ainsi que la loi de C. F. Gauss (1777–1855). La loi de Weber nous permet également de déduire la force d'Ampère entre les éléments de courant, la loi des circuits magnétiques et la loi de l'induction de Faraday.

L'électrodynamique de Weber n'est pas abordée dans les manuels modernes. Malgré cela, cette théorie suscite un intérêt croissant depuis quelque temps. Cet intérêt est motivé par de nouvelles expériences et de nouveaux résultats théoriques.

Je crois en l'électrodynamique de Weber et la considère comme la formulation la plus profonde et la plus importante jamais présentée pour décrire les interactions

³³[Max54b, article 527, p. 174].

³⁴527.] Of these four different assumptions that of Ampère is undoubtedly the best, since it is the only one which makes the forces on the two elements not only equal and opposite but in the straight line which joins them.

³⁵[Amp26], [Amp23], [Cha09], [AC11] et [AC15]. Voir également [Ass92a], [Ass94], [BA01], [BA15] et [Ass15a].

³⁶[Web92b], [Web92a], [Web93b], [Web94c], [Web93a] et [Web94b].

³⁷[Web46], [Web52b], [Web52a], [KW57], [Web64], [Web71], [Web78] et [Web94a].

³⁸[Ass22], [AB23]; [AC11], [AC15]; [Ass21a], [Ass21b], [Ass21c], [Ass21d], [Ass24], [Ass25a], [Ass25b], [Ass25c] et [Ass25d].



FIG. 14.15 : Wilhelm Eduard Weber (1804–1891).

entre particules électrisées. Je travaille sur cette théorie depuis que je l'ai découverte.³⁹

³⁹Voir, par exemple, [Wie60], [Wie67], [Whi73a, pp. 201–206], [Ass89], [Ass90a], [Ass90b], [Ass91b], [Ass91a], [Ass92a], [Ass92c], [Ass92b], [AC93], [Ass94], [GA94], [Ass95a], [Ass95c], [Ass95b], [AB95], [AB96], [GV99], [BA01], [ARW02], [Fuk03], [AW03], [ARW04], [AH07], [AH09], [AWW11], [AH13], [AWW14], [BA15] et [Ass15a], ainsi que les références citées dans ces ouvrages.

Bibliographie

- [AB95] A. K. T. Assis and M. Bueno. Longitudinal forces in Weber's electrodynamics. *International Journal of Modern Physics B*, 9:3689–3696, 1995.
- [AB96] A. K. T. Assis and M. A. Bueno. Equivalence between Ampère and Grassmann's forces. *IEEE Transactions on Magnetics*, 32:431–436, 1996.
- [AB23] A. K. T. Assis et L. L. Bucciarelli. *Coulomb's Memoirs on Torsion, Electricity, and Magnetism Translated into English*. Apeiron, Montréal, 2023. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [AC93] A. K. T. Assis and R. A. Clemente. The influence of temperature on gravitation. *Il Nuovo Cimento B*, 108:713–716, 1993.
- [AC11] A. K. T. Assis and J. P. M. d. C. Chaib. *Eletrodinâmica de Ampère: Análise do Significado e da Evolução da Força de Ampère, Juntamente com a Tradução Comentada de Sua Principal Obra sobre Eletrodinâmica*. Editora da Unicamp, Campinas, 2011.
- [AC15] A. K. T. Assis and J. P. M. C. Chaib. *Ampère's Electrodynamics — Analysis of the Meaning and Evolution of Ampère's Force between Current Elements, together with a Complete Translation of His Masterpiece: Theory of Electrodynamical Phenomena, Uniquely Deduced from Experience*. Apeiron, Montréal, 2015. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ach96] M. Achilles. *Historische Versuche der Physik nachgebaut und kommentiert*. Wötzel, Frankfurt, 2^e édition, 1996.
- [AH07] A. K. T. Assis and J. A. Hernandes. *The Electric Force of a Current: Weber and the Surface Charges of Resistive Conductors Carrying Steady Currents*. Apeiron, Montréal, 2007. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [AH09] A. K. T. Assis and J. A. Hernandes. *A Força Elétrica de uma Corrente: Weber e as Cargas Superficiais de Condutores Resistivos com Correntes Constantes*, volume 73 de *Coleção Acadêmica*. Edusp and Edufal, São Paulo et Maceió, 2009.
- [AH13] A. K. T. Assis and J. A. Hernandes. *Elektrischer Strom und Oberflächenladungen: was Wilhelm Weber schon vor mehr als 150 Jahre wußte*.

Apeiron, Montréal, 2013. Traduction allemande par H. Härtel. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.

- [Amp22a] A.-M. Ampère. Expériences relatives à de nouveaux phénomènes électrodynamiques. *Annales de Chimie et de Physique*, 20:60–74, 1822.
- [Amp22b] A.-M. Ampère. Expériences relatives aux nouveaux phénomènes électrodynamiques que j'ai obtenus au mois de décembre 1821. In A.-M. Ampère, éditeur, *Recueil d'Observations Électro-dynamiques*, pp. 237–250. Crochard, Paris, 1822. Malgré la date, le volume du Recueil n'a été publié qu'en 1823.
- [Amp22c] A.-M. Ampère. Exposé sommaire des nouvelles expériences électromagnétiques faites par différents Physiciens, depuis le mois de mars 1821, lu dans la séance publique de l'Académie royale des Sciences, le 8 avril 1822. In A.-M. Ampère, éditeur, *Recueil d'Observations Électro-dynamiques*, pp. 199–206. Crochard, Paris, 1822. Malgré la date, le volume du Recueil n'a été publié qu'en 1823.
- [Amp23] A.-M. Ampère. Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience, dans lequel se trouvent réunis les Mémoires que M. Ampère a communiqués à l'Académie royale des Sciences, dans les séances des 4 et 26 décembre 1820, 10 juin 1822, 22 décembre 1823, 12 septembre et 21 novembre 1825. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, 6:175–387, 1823. Malgré la date, le travail n'a été publié qu'en 1827.
- [Amp26] A.-M. Ampère. *Théorie des Phénomènes Électro-dynamiques, Uniquement Déduite de l'Expérience*. Méquignon-Marvis, Paris, 1826.
- [Amp85a] A.-M. Ampère. Expériences relatives aux nouveaux phénomènes électrodynamiques obtenus au mois de décembre 1821. In J. Joubert, éditeur, *Collection de Mémoires relatifs à la Physique*, volume 2: *Mémoires sur l'Électrodynamique*, pp. 192–204. Gauthier-Villars, Paris, 1885.
- [Amp85b] A.-M. Ampère. Exposé sommaire des nouvelles expériences électromagnétiques faites par différents physiciens, depuis le mois de mars 1821, lu dans la séance publique de l'Académie royale des Sciences, le 8 avril 1822. In J. Joubert, éditeur, *Collection de Mémoires relatifs à la Physique*, volume 2: *Mémoires sur l'Électrodynamique*, pp. 238–244. Gauthier-Villars, Paris, 1885.
- [APZ06] M. S. Amin, T. F. Peterson Jr., and M. Zahn. Advanced Faraday cage measurements of charge and open-circuit voltage using water dielectrics. *Journal of Electrostatics*, 64:424–340, 2006.
- [ARW02] A. K. T. Assis, K. Reich, and K. H. Wiederkehr. Gauss and Weber's creation of the absolute system of units in physics. *21st Century Science & Technology*, 15(3):40–48, 2002.

- [ARW04] A. K. T. Assis, K. Reich, and K. H. Wiederkehr. On the electromagnetic and electrostatic units of current and the meaning of the absolute system of units — For the 200th anniversary of Wilhelm Weber’s birth. *Sudhoffs Archiv*, 88:10–31, 2004.
- [Ass89] A. K. T. Assis. On Mach’s principle. *Foundations of Physics Letters*, 2:301–318, 1989.
- [Ass90a] A. K. T. Assis. Deriving Ampère’s law from Weber’s law. *Hadronic Journal*, 13:441–451, 1990.
- [Ass90b] A. K. T. Assis. Modern experiments related to Weber’s electrodynamics. In U. Bartocci and J. P. Wesley, éditeurs, *Proceedings of the Conference on Foundations of Mathematics and Physics*, pp. 8–22, Blumberg, 1990. Benjamin Wesley Publisher.
- [Ass91a] A. K. T. Assis. Can a steady current generate an electric field? *Physics Essays*, 4:109–114, 1991.
- [Ass91b] A. K. T. Assis. Wilhelm Eduard Weber (1804–1891) — Sua vida e sua obra. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, 5:53–59, 1991.
- [Ass92a] A. K. T. Assis. *Curso de Eletrodinâmica de Weber*. Setor de Publicações do Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas — UNICAMP, Campinas, 1992. Notas de Física IFGW Número 5. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis> et <https://www.bibliotecadigital.unicamp.br/bd/index.php/detalhes-material/?code=60362>.
- [Ass92b] A. K. T. Assis. On forces that depend on the acceleration of the test body. *Physics Essays*, 5:328–330, 1992.
- [Ass92c] A. K. T. Assis. On the mechanism of railguns. *Galilean Electrodynamics*, 3:93–95, 1992.
- [Ass94] A. K. T. Assis. *Weber’s Electrodynamics*. Kluwer, Dordrecht, 1994. Ce livre est maintenant disponible chez Springer. Doi: 10.1007/978-94-017-3670-1 and <https://www.springer.com/gp/book/9780792331377>.
- [Ass95a] A. K. T. Assis. Acceleration dependent forces: reply to Smulsky. *Apeiron*, 2:25, 1995.
- [Ass95b] A. K. T. Assis. A eletrodinâmica de Weber e seus desenvolvimentos recentes. *Ciência e Natureza*, 17:7–16, 1995.
- [Ass95c] A. K. T. Assis. Weber’s force versus Lorentz’s force. *Physics Essays*, 8:335–341, 1995.
- [Ass10a] A. K. T. Assis. *The Experimental and Historical Foundations of Electricity*. Apeiron, Montréal, 2010. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.

- [Ass10b] A. K. T. Assis. *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*. Apeiron, Montréal, 2010. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass10c] A. K. T. Assis. Wilhelm Weber's works translated into English. *21st Century Science & Technology*, 22(4):67–69, 2010.
- [Ass11] A. K. T. Assis. *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*. Editora Livraria da Física, São Paulo, 2011.
- [Ass13] A. K. T. Assis. *Mecânica Relacional e Implementação do Princípio de Mach com a Força de Weber Gravitacional*. Apeiron, Montréal, 2013. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass14] A. K. T. Assis. *Relational Mechanics and Implementation of Mach's Principle with Weber's Gravitational Force*. Apeiron, Montréal, 2014. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass15a] A. K. T. Assis. *Eletrodinâmica de Weber: Teoria, Aplicações e Exercícios*. Editora da Unicamp, Campinas, 2^e édition, 2015. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis> et <https://editoraunicamp.com.br/catalogo/?id=1718>.
- [Ass15b] A. K. T. Assis. *Экспериментальные и Исторические Основы Электричества*. Apeiron, Montréal, 2015. Traduit par A. Baraov à partir de la version anglaise. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass17] A. K. T. Assis. *I Fondamenti Sperimentali e Storici dell'Elettricità*. Associazione per l'Insegnamento della Fisica, Parma, 2017. La Fisica nella Scuola, Anno L, n. 2 Supplemento, Quaderno 26. Traduit par P. Cerreta, A. Cerreta et R. Cerreta. Édité par P. Cerreta, R. Serafini et R. Urigu. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass18a] A. K. T. Assis. *The Experimental and Historical Foundations of Electricity*, volume 2. Apeiron, Montréal, 2018. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass18b] A. K. T. Assis. *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*, volume 2. Apeiron, Montréal, 2018. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass19] A. K. T. Assis. *Экспериментальные и Исторические Основы Электричества*, volume 2. Apeiron, Montréal, 2019. Traduit par A. Baraov à partir de la version anglaise. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass22] A. K. T. Assis. *Tradução Comentada das Principais Obras de Coulomb sobre Eletricidade e Magnetismo*. Apeiron, Montréal, 2022. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.

- [Ass21a] A. K. T. Assis (éditeur). *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume 1: *Gauss and Weber's Absolute System of Units*. Apeiron, Montréal, 2021. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass21b] A. K. T. Assis (éditeur). *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume 2: *Weber's Fundamental Force and the Unification of the Laws of Coulomb, Ampère and Faraday*. Apeiron, Montréal, 2021. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass21c] A. K. T. Assis (éditeur). *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume 3: *Measurement of Weber's Constant c , Diamagnetism, the Telegraph Equation and the Propagation of Electric Waves at Light Velocity*. Apeiron, Montréal, 2021. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass21d] A. K. T. Assis (éditeur). *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume 4: *Conservation of Energy, Weber's Planetary Model of the Atom and the Unification of Electromagnetism and Gravitation*. Apeiron, Montréal, 2021. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass24] A. K. T. Assis (éditeur). *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volume 5: *Unipolar Induction, Galvanometry, Biographical Studies, and Weber's Electrodynamics Versus Different Field Theories*. Apeiron, Montréal, 2024. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass25a] A. K. T. Assis. *Obras de Weber sobre Eletrodinâmica Traduzidas e Comentadas*, volume 1: *Biografia, Magnetismo, Indução Unipolar, e o Sistema Absoluto de Unidades de Gauss e Weber*. Apeiron, Montréal, 2025. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass25b] A. K. T. Assis. *Obras de Weber sobre Eletrodinâmica Traduzidas e Comentadas*, volume 2: *A Força de Weber e a Unificação das Leis de Coulomb, Ampère e Faraday*. Apeiron, Montréal, 2025. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass25c] A. K. T. Assis. *Obras de Weber sobre Eletrodinâmica Traduzidas e Comentadas*, volume 3: *Medição da Constante c de Weber, Diamagnetismo, a Equação do Telégrafo, e a Propagação de Ondas Elétricas na Velocidade da Luz*. Apeiron, Montréal, 2025. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass25d] A. K. T. Assis. *Obras de Weber sobre Eletrodinâmica Traduzidas e Comentadas*, volume 4: *Conservação da Energia, o Modelo Planetário de Weber para o Átomo, a Unificação do Eletromagnetismo com a Gravitação, e a Eletrodinâmica de Weber Contra as Teorias de Campo*. Apeiron, Montréal, 2025. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.

- [AW03] A. K. T. Assis and K. H. Wiederkehr. Weber quoting Maxwell. *Mitteilungen der Gauss-Gesellschaft*, 40:53–74, 2003.
- [AWW11] A. K. T. Assis, K. H. Wiederkehr, and G. Wolfschmidt. *Weber’s Planetary Model of the Atom*, volume 19 of *Nuncius Hamburgensis — Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften*. Tredition Science, Hamburg, 2011. Édité par G. Wolfschmidt.
- [AWW14] A. K. T. Assis, K. H. Wiederkehr, and G. Wolfschmidt. *O Modelo Planetário de Weber para o Átomo*. Apeiron, Montréal, 2014. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [BA01] M. d. A. Bueno and A. K. T. Assis. *Inductance and Force Calculations in Electrical Circuits*. Nova Science Publishers, Huntington, New York, 2001.
- [BA15] M. Bueno and A. K. T. Assis. *Cálculo de Indutância e de Força em Circuitos Elétricos*. Apeiron, Montréal, 2^e édition, 2015. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [BAC12] S. L. B. Boss, A. K. T. Assis, and J. J. Caluzi. *Stephen Gray e a Descoberta dos Condutores e Isolantes: Tradução Comentada de Seus Artigos sobre Eletricidade e Reprodução de Seus Principais Experimentos*. Editora Cultura Acadêmica da Unesp, São Paulo, 2012. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis> et <https://www.culturaacademica.com.br/catalogo/stephen-gray-e-a-descoberta-dos-condutores-e-isolantes/>.
- [Bai01] A. G. Bailey. The charging of insulator surfaces. *Journal of Electrostatics*, 51–52:82–90, 2001.
- [BC07] S. L. B. Boss and J. J. Caluzi. Os conceitos de eletricidade vítrea e eletricidade resinosa segundo Du Fay. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29:635–644, 2007.
- [Bea96] W. Beaty. Sticky electrostatics. <https://www.amasci.com/emotor/sticky.html>, 1996.
- [Beu92] G. Beuermann. “Sie schwänzen aber jetzt schon, bis es blitzt und donnert” - Physik - Lichtenbergs Leidenschaft. *Physikalische Blätter*, 48:440–444, 1992.
- [BGP16] T. A. L. Burgo, F. Galembeck, and G. H. Pollack. Where is water in the triboelectric series? *Journal of Electrostatics*, 80:30–33, 2016. Doi: 10.1016/j.elstat.2016.01.002.
- [BJ92] P. Brix and U. Joost. Mit wenigen Worten viel sagen — Georg Christoph Lichtenberg zum 250. Geburtstag. *Physikalische Blätter*, 48:437–439, 1992.
- [Blo82] C. Blondel. *A.-M. Ampère et la Création de l’Électrodynamique (1820–1827)*. Bibliothèque Nationale, Paris, 1982.

- [Bos07] T. H. S. Bossa *et al.*, 2007. Estudo da condutividade elétrica de vidros isoladores de linhas de transmissão HVDC dopados. In: Congresso da Academia Trinacional de Ciências, II, Foz do Iguaçu, PR, Brazil. <https://www.foz.unioeste.br/~lamat/publicvidros/condutivc3n2007.pdf>.
- [Bos11] S. L. B. Boss. *Tradução comentada de artigos de Stephen Gray (1666–1736) e reprodução de experimentos históricos com materiais acessíveis - subsídios para o ensino do eletricidade*. Doctorat en Éducation de la Science, Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Bauru, SP, Brazil, 2011. Superviseurs: J. J. Caluzi and A. K. T. Assis. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [BW10] C. Blondel and B. Wolff. L'électricité de pression de Haüy et l'électricité de frottement font cause commune. <https://www.ampere.cnrs.fr/labo/>, 2010.
- [BW11] C. Blondel and B. Wolff. Créer de l'électricité avec le magnétisme? La découverte de l'induction. <https://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique>, 2011.
- [BW12a] C. Blondel and B. Wolff. La loi d'Ohm: la délicate genèse d'une loi "simple". <https://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique>, 2012.
- [BW12b] C. Blondel and B. Wolff. Teinturiers et tubes de verre: Gray et Dufay. <https://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique>, 2012.
- [BW12c] C. Blondel and B. Wolff. Un phénomène plus complexe qu'il n'y paraît: l'attraction des corps légers ou d'un filet d'eau. <https://www.ampere.cnrs.fr/labo/>, 2012.
- [BW13] C. Blondel and B. Wolff. La proportionnalité de la force électrique aux charges: définition ou loi expérimentale? <https://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique>, 2013.
- [CA08] J. Camillo and A. K. T. Assis. Construção de um gerador eletrostático gotejante: chuva elétrica de Kelvin. *A Física na Escola*, 9:29–32, 2008. Video présentant l'étincelle produite dans cet engin disponible à <https://www.ifi.unicamp.br/~assis> et <https://www.youtube.com/watch?v=X7WPSQMtiU0>.
- [Cam06] J. Camillo. Geradores eletrostáticos: esfera de enxofre de Otto von Guericke e chuva elétrica de Kelvin. Mémoire de fin d'études réalisé à l'Institut de Physique de l'Université de Campinas — UNICAMP, Brazil. Superviseur: A. K. T. Assis. 2006. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis> et https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2006/JulianoC-Assis_F809_RFcompleto.pdf.

- [Cer14a] P. Cerreta, 2014. Experimenti di elettrostatica. https://www.scienzaviva.it/Esperimenti_elettrostatica_2014.php.
- [Cer14b] P. Cerreta. *Il pendolino, il versorium e l'elettroscopio*, pp. 53–56. Associazione per l'Insegnamento della Fisica, Perugia, 2014. Supplemento al n. 3/2015 LFnS, Atti del LIII Congresso Nazionale AIF.
- [Cer17] P. Cerreta, 2017. Rubbing. Electroscopes and Conductors. Vidéo de l'édition 2017 de *Science on Stage*, Debrecen, Hungary. https://www.scienzaviva.it/video_15.php.
- [Cha09] J. P. M. d. C. Chaib. *Análise do Significado e da Evolução do Conceito de Força de Ampère, juntamente com a Tradução Comentada de Sua Principal Obra sobre Eletrodinâmica*. Thèse de doctorat, University of Campinas — UNICAMP, Campinas, Brazil, 2009. Superviseur: A. K. T. Assis. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis> et <http://repositorio.unicamp.br/Acervo/Detalhe/435449>.
- [Chi54] R. A. Chipman. An unpublished letter of Stephen Gray on electrical experiments, 1707–1708. *Isis*, 45:33–40, 1954.
- [Coh66] I. B. Cohen. *Franklin and Newton: An Inquiry into Speculative Newtonian Experimental Science and Franklin's Work in Electricity as an Example Thereof*. Harvard University Press, Cambridge, 1966.
- [Coh96] I. B. Cohen. *Benjamin Franklin's Science*. Harvard University Press, Cambridge, 1996.
- [Cou88a] C. A. Coulomb. Premier mémoire sur l'électricité et le magnétisme. Construction et usage d'une balance électrique, fondée sur la propriété qu'ont les fils de métal, d'avoir une force de réaction de torsion proportionnelle à l'angle de torsion. Détermination expérimentale de la loi suivant laquelle les élémens des corps électrisés du même genre d'électricité, se repoussent mutuellement. *Mémoires de l'Académie royale des Sciences. Année 1785*, 88:569–577, 1788. Publié en 1788. Réimprimé dans A. Potier (ed.), *Collection de Mémoires relatifs à la Physique*, volume 1: *Mémoires de Coulomb*, pp. 107–115 (Gauthiers-Villars, Paris, 1884).
- [Cou88b] C. A. Coulomb. Second mémoire sur l'électricité et le magnétisme. Où l'on détermine, suivant quelles loix le fluide magnétique, ainsi que le fluide électrique, agissent, soit par répulsion, soit par attraction. *Mémoires de l'Académie royale des Sciences. Année 1785*, 88:578–611, 1788. Publié en 1788. Réimprimé dans A. Potier (ed.), *Collection de Mémoires relatifs à la Physique*, volume 1: *Mémoires de Coulomb*, pp. 116–146 (Gauthiers-Villars, Paris, 1884).
- [Cou35] A. Coulomb. First memoir on electricity and magnetism. In W. F. Magie, éditeur, *A Source Book in Physics*, pp. 408–413, New York, 1935. McGraw-Hill. Traduction partielle de la publication originelle (1788) en français.

- [CS02] R. W. Chabay and B. A. Sherwood. *Matter & Interactions*, volume 2: Electric and Magnetic Interactions. Wiley, New York, 2002.
- [Des76] A. P. Deschanel. *Elementary Treatise on Natural Philosophy*. D. Appleton and Co., New York, 1876. Traduit par J. D. Everett.
- [DF33a] C. F. d. C. Du Fay. Premier mémoire sur l'électricité. Histoire de l'électricité. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pp. 23–35, 1733.
- [DF33b] C. F. d. C. Du Fay. Quatrième mémoire sur l'électricité. De l'attraction et répulsion des corps électriques. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pp. 457–476, 1733.
- [DF33c] C. F. d. C. Du Fay. Second mémoire sur l'électricité. Quels sont les corps qui sont susceptibles d'électricité. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pp. 73–84, 1733.
- [DF34a] C. F. d. C. Du Fay. A letter from Mons. Du Fay, F. R. S. and of the Royal Academy of Sciences at Paris, to His Grace Charles Duke of Richmond and Lenox, concerning electricity. Translated from the French by T. S. M. D. *Philosophical Transactions*, 38:258–266, 1733–1734.
- [DF34b] C. F. d. C. Du Fay. Cinquième mémoire sur l'électricité. Où l'on rend compte des nouvelles découvertes sur cette matière, faites depuis peu par M. Gray; et où l'on examine quelles sont les circonstances qui peuvent apporter quelque changement à l'électricité pour l'augmentation ou la diminution de la force, comme la température de l'air, le vuide, l'air comprimé, etc. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pp. 341–361, 1734.
- [Ear42] S. Earnshaw. On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 7:97–114, 1842.
- [Egu25] M. Eguchi. On the permanent electret. *Philosophical Magazine*, 49:178–192, 1925.
- [Far38] M. Faraday. Experimental researches in electricity. Eleventh series. *Philosophical Transactions*, 128:1–40, 1838. Read December 21, 1837. Réimprimé dans *Great Books of the Western World*, R. M. Hutchins (éditeur), (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952), volume 45: *Lavoisier, Fourier, Faraday*, pp. 440–467, paragraphes 1161–1317.
- [Far43a] M. Faraday. Experimental researches in electricity. Eighteenth series. *Philosophical Transactions*, 133:17–32, 1843. Read February 2, 1843. Réimprimé dans *Great Books of the Western World*, R. M. Hutchins (éditeur), (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952), volume 45: *Lavoisier, Fourier, Faraday*, pp. 584–594, paragraphes 2075–2145.

- [Far43b] M. Faraday. On static electrical inductive action. *Philosophical Magazine*, 22:200–204, 1843. Réimprimé dans *Great Books of the Western World*, R. M. Hutchins (éditeur), (Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952), volume 45: *Lavoisier, Fourier, Faraday*, pp. 848–850.
- [Far52] M. Faraday. *Experimental Researches in Electricity*, volume 45, pp. 253–898 of *Great Books of the Western World*. Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952.
- [Fer78] N. C. Ferreira. Proposta de Laboratório para a Escola Brasileira — Um Ensaio sobre a Instrumentalização no Ensino Médio de Física. Master's thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 1978.
- [Fer00] G. F. L. Ferreira. Há 50 anos: o efeito Costa Ribeiro. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 22:434–443, 2000.
- [Fer01a] N. C. Ferreira. Acende aqui, apaga ali. *Ciência Hoje na Escola*, 12:65–67, 2001.
- [Fer01b] N. C. Ferreira. Faça como Gilbert: construa uma bússola de declinação. *Ciência Hoje na Escola*, 12:21–22, 2001.
- [Fer01c] N. C. Ferreira. Magnetismo e eletricidade. *Ciência Hoje na Escola*, 12:14–17, 2001.
- [Fer01d] N. C. Ferreira. O versorium. *Ciência Hoje na Escola*, 12:18–20, 2001.
- [Fer06] N. Ferreira. *Equilíbrio*. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino, Instituto de Física, USP., São Paulo, Brazil, 2006. <http://web.archive.org/web/20140815044834/http://www.cienciamao.usp.br/tudo/indice.php?midia=rip>.
- [Fersda] N. Ferreira, [s.d.]. *Mecânica*. Instituto de Física, USP, São Paulo, Brazil. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino.
- [Fersdb] N. Ferreira, [s.d.]. *Eletrostática*, volume 1. Instituto de Física, USP, São Paulo, Brazil. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino.
- [Fersdc] N. Ferreira, [s.d.]. *Eletrostática*, volume 2. Instituto de Física, USP, São Paulo, Brazil. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino.
- [Fersdd] N. C. Ferreira, [s.d.]. Construa sua própria bússola! <http://chc.org.br/acervo/construa-sua-propria-bussola/>.
- [FLS64] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands. *The Feynman Lectures on Physics*. Addison-Wesley, Reading, 1964. volume 2: Mainly Electromagnetism and Matter.
- [FM91] N. Ferreira and J.-P. Maury. *Plus et Moins, les Charges Électriques. Qu'est-ce que c'est?* Ophrys, Paris, 1991.

- [FPsd] D. Frerichs and S. Pfeiler, [s.d.]. Historische Einführung in die Elektrostatik. https://www.physikalische-schulexperimente.de/physo/Historische_Einf%C3%BChrung_in_die_Elektrostatik#cite_ref-1.
- [FR08] N. C. Ferreira and E. M. d. F. Ramos. *Cadernos de Instrumentação para o Ensino de Física: Eletrostática*. Unesp, Rio Claro, 2008. Coleção Ludoteca, volume 1.
- [Fra69] B. Franklin. *Experiments and Observations on Electricity, Made at Philadelphia in America*. David Henry, London, 1769.
- [Fra04] B. Franklin. *The Works of Benjamin Franklin*. G. P. Putnam's Sons, 1904. 12 volumes.
- [Fra41] B. Franklin. *Benjamin Franklin's Experiments — A new edition of Franklin's Experiments and Observations on Electricity*, I. B. Cohen (ed.). Harvard University Press, Cambridge, 1941.
- [Fra81] O. I. Franksen. *H. C. Ørsted — A Man of the Two Cultures*. Strandbergs Forlag, Birkerød, 1981.
- [Fuk00] E. Fukada. History and recent progress in piezoelectric polymers. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 47:1277–1290, 2000.
- [Fuk03] J. Fukai. *A Promenade Along Electrodynamics*. Vales Lake Publishing, Pueblo West, 2003.
- [GA94] P. Graneau and A. K. T. Assis. Kirchhoff on the motion of electricity in conductors. *Apeiron*, 19:19–25, 1994.
- [Gal14] F. Galembeck *et al.* Friction, tribochemistry and triboelectricity: recent progress and perspectives. *RSC Advances*, 4:64280–64298, 2014. Doi: 10.1039/c4ra09604e.
- [Gas91] A. Gaspar. Motor de ímã móvel. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 8:188–193, 1991.
- [Gas96] A. Gaspar. *História da Eletricidade*. Ática, São Paulo, 1996.
- [Gas00] A. Gaspar. *Eletromagnetismo - Física Moderna*. Ática, São Paulo, 2000.
- [Gas03] A. Gaspar. *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental*. Ática, São Paulo, 2003.
- [Gas13] A. Gaspar. *Compreendendo a Física*, volume 3: Eletromagnetismo e Física Moderna. Ática, São Paulo, 2013. 2ª edição. Manual do Professor.
- [GB17] F. Galembeck and A. L. Burgo. *Chemical Electrostatics*. Springer, Berlin, 2017.

- [Gil00] W. Gilbert. *On the Magnet, Magnetick Bodies also, and on the Great Magnet the Earth; a New Physiology, Demonstrated by Many Arguments & Experiments*. Chiswick Press, London, 1900. Traduit par S. P. Thompson.
- [Gil71a] C. S. Gillmor. *Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering in Eighteenth-Century France*. Princeton University Press, Princeton, 1971.
- [Gil71b] C. S. Gillmor. Coulomb, Charles Augustin. In C. C. Gillispie, éditeur, *Dictionary of Scientific Biography*, volume 3, pp. 439–447. Charles Scribner's Sons, New York, 1971.
- [Gil78] W. Gilbert. *On the Loadstone and Magnetic Bodies and on the Great Magnet the Earth*, volume 28, pp. 1–121 of *Great Books of the Western World*. Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1978. Traduit par P. F. Mottelay.
- [Gra21] S. Gray. An account of some new electrical experiments. *Philosophical Transactions*, 31:104–107, 1720–1721.
- [Gra32a] S. Gray. The electricity of water. *Philosophical Transactions*, 37:227–230 (addenda in page 260), 1731–1732.
- [Gra32b] S. Gray. Farther account of his experiments concerning electricity. *Philosophical Transactions*, 37:285–291, 1731–1732.
- [Gra32c] S. Gray. Farther accounts of his experiments concerning electricity. *Philosophical Transactions*, 37:397–407, 1731–1732.
- [Gra32d] S. Gray. Several experiments concerning electricity. *Philosophical Transactions*, 37:18–44, 1731–1732.
- [Gra36a] S. Gray. Experiments and observations upon the light that is produced by communicating electrical attraction to animate or inanimate bodies, together with some of its most surprising effects. *Philosophical Transactions*, 39:16–24, 1735–1736.
- [Gra36b] S. Gray. Some experiments relating to electricity. *Philosophical Transactions*, 39:166–170, 1735–1736.
- [Gre94] T. B. Greenslade Jr. The hydro-electrical machine. *The Physics Teacher*, 32:210–211, 1994.
- [Gro54] B. Gross. Theory of thermodielectric effect. *Physical Review*, 94:1545–1551, 1954.
- [Gui12] J. Guisasola. Book review: Andre Koch Torres Assis (2010) *The Experimental and Historical Foundations of Electricity*. *Science & Education*, 21:283–285, 2012. Doi: 10.1007/s11191-010-9318-z.
- [GV99] J. Guala-Valverde. *Inercia y Gravitacion*. Fundacion Julio Palacios, Neuquen, Argentina, 1999. In collaboration with J. Tramaglia and R. Rapacioli. <https://www.educ.ar/recursos/90380>.

- [Har67] W. S. Harris. *A Treatise on Frictional Electricity, in Theory and Practice*. Virtue and Co., London, 1867. Édité par C. Tomlinson.
- [Har82] P. M. Harman. *Energy, Force, and Matter — The Conceptual Development of Nineteenth-Century Physics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1982.
- [Här12] H. Härtel. Die Natur macht keine Sprünge — auch nicht beim Ohm'schen Gesetz. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 5:31–35, 2012.
- [Hau09] F. Hauksbee. An account of the repetition of an experiment touching motion given bodies included in a glass, by the approach of a finger near its outside: With other experiments on the effluvia of glass. *Philosophical Transactions*, 26:82–86, 1708–1709.
- [Hea87] O. Heaviside. Electromagnetic induction and its propagation. *The Electrician*, 1885–87. Réimprimé dans O. Heaviside, *Electrical Papers* (Macmillan, London, 1892), volume 1, article 30, pp. 429–560 and O. Heaviside, *Electrical Papers* (Macmillan, London, 1894), volume 2, article 35, pp. 39–155.
- [Hec96] L. Hecht. The significance of the 1845 Gauss-Weber correspondence. *21st Century Science & Technology*, 9(3):22–34, 1996. https://21sci-tech.com/articles/Atomic_Science.pdf et <https://archive.org/details/WeberAmpereElectrodynamicsHistory>.
- [Hee92] P. Heering. On Coulomb's inverse square law. *American Journal of Physics*, 60:988–994, 1992.
- [Hei66] J. L. Heilbron. G. M. Bose: the prime mover in the invention of the Leyden jar? *Isis*, 57:264–267, 1966.
- [Hei99] J. L. Heilbron. *Electricity in the 17th and 18th Centuries — A Study in Early Modern Physics*. Dover, New York, 1999.
- [Hom81] R. W. Home. *The Effluvial Theory of Electricity*. Arno Press, New York, 1981.
- [Jea27] J. Jeans. *The Mathematical Theory of Electricity and Magnetism*. Cambridge University Press, Cambridge, 1927.
- [Jec12] B. Jech. Sur l'expérience de Desaguliers de la déviation d'un filet d'eau par une tige électrisée. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 946:737–760, 2012.
- [Jef59] O. Jefimenko. Lecture demonstrations on electrification by contact. *American Journal of Physics*, 27:604–605, 1959. Doi: 10.1119/1.1934925.
- [Jef71a] O. Jefimenko. Franklin's electric motors. *American Journal of Physics*, 39:1139–1140, 1971.

- [Jef71b] O. Jefimenko. Operation of electric motors from the atmospheric electric field. *American Journal of Physics*, 39:776–778, 1971.
- [Jef73] O. D. Jefimenko. *Electrostatic Motors: Their History, Types, and Principles of Operation*. Electret Scientific, Star City, 1973.
- [JG17] W. T. Jardim and A. Guerra. República das letras, academias e sociedades científicas no século XVIII: a garrafa de Leiden e a ciência no ensino. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 34:774–797, 2017. Doi: 10.5007/2175-7941.2017v34n3p774.
- [JM86] C. Jungnickel and R. McCormach. *Intellectual Mastery of Nature — Theoretical Physics from Ohm to Einstein*, volume 1–2. University of Chicago Press, Chicago, 1986.
- [JW71] O. Jefimenko and D. K. Walker. Electrostatic motors. *The Physics Teacher*, 9:121–129, 1971.
- [JW80] O. D. Jefimenko and D. Walker. Electrets. *The Physics Teacher*, 18:651–659, 1980.
- [Kat06] S. Katzir. *The Beginnings of Piezoelectricity - A Study in Mundane Physics*, volume 246 de *Boston Studies in Philosophy of Science*. Springer, Dordrecht, 2006.
- [Kip09] N. Kipnis. A law of physics in the classroom: the case of Ohm’s law. *Science & Education*, 18:349–382, 2009. Doi: 10.1007/s11191-008-9142-x.
- [Kir49] G. Kirchhoff. Ueber eine Ableitung der Ohm’schen Gesetze, welche sich an die Theorie der Elektrostatik anschliesst. *Annalen der Physik und Chemie*, 78:506–513, 1849. Réimprimé dans G. Kirchhoff’s *Gesammelte Abhandlungen* (Barth, Leipzig, 1882), pp. 49–55.
- [Kir50] G. Kirchhoff. On a deduction of Ohm’s law, in connexion with the theory of electrostatics. *Philosophical Magazine*, 37:463–468, 1850.
- [Kir57] F. Kirchner. Determination of the velocity of light from electromagnetic measurements according to W. Weber and R. Kohlrausch. *American Journal of Physics*, 25:623–629, 1957. Traduit par A. Akeley.
- [KW57] R. Kohlrausch and W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Zurückführung der Stromintensitäts-Messungen auf mechanisches Maass. *Abhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physischen Classe*, 3:221–292, 1857. Réimprimé dans *Wilhelm Weber’s Werke*, volume 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 609–676.
- [LB08] C.-Y. Liu and A. J. Bard. Electrostatic electrochemistry at insulators. *Nature Materials*, 7:505–509, 2008. Doi: 10.1038/nmat2160.

- [LB09] C.-Y. Liu and A. J. Bard. Electrons on dielectrics and contact electrification. *Chemical Physics Letters*, 480:145–156, 2009. Doi: 10.1016/j.cplett.2009.08.045.
- [Lic56] G. C. Lichtenberg. *Über eine neue Methode, die Natur und die Bewegung der elektrischen Materie zu erforschen*, volume 246 of *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften*. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1956. Herausgegeben in neuer deutscher Übersetzung von H. Puppe.
- [Llo80] J. T. Lloyd. Lord Kelvin demonstrated. *The Physics Teacher*, 18:16–24, 1980.
- [Lom17] M. V. Lomonosov, 2017. Discourse on atmospheric phenomena originating from electrical force. Traduction anglaise en commentaire par V. Shiltsev. arXiv:1709.08847 [physics.hist-ph].
- [Lor95] H. A. Lorentz. *Versuch einer Theorie der Electricischen und Optischen Erscheinungen in Bewegten Körpern*. E. J. Brill, Leiden, 1895. Réimprimé dans H. A. Lorentz, *Collected Papers* (Springer, Dordrecht, 1937), volume V, pp. 1–138. Traduction anglaise de Wikisource disponible à https://en.wikisource.org/wiki/Translation:Attempt_of_a_Theory_of_Electrical_and_Optical_Phenomena_in_Moving_Bodies.
- [LSB08] C. E. Laburú, O. H. M. d. Silva, and M. A. Barros. Laboratório caseiro - pára-raios: um experimento simples e de baixo custo para a eletrostática. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 25:168–182, 2008.
- [MA08] C. P. Magnaghi and A. K. T. Assis. Sobre a eletricidade excitada pelo simples contato entre substâncias condutoras de tipos diferentes – Uma tradução comentada do artigo de Volta de 1800 descrevendo sua invenção da pilha elétrica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 25:118–140, 2008.
- [Mag06] C. P. Magnaghi. Origem da corrente elétrica – a invenção da pilha. Mémoire de fin d'études réalisé à l'Institut de Physique de l'Université de Campinas – UNICAMP, Brazil. Superviseur: A. K. T. Assis. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis> et https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2006/CenoP-Assis_RF1.pdf, 2006.
- [Mas87] S. Mascarenhas. Bioelectrets: electrets in biomaterials and biopolymers. In G. M. Sessler, éditeur, *Electrets*, pp. 321–346. Springer, Berlin, 2^e édition, 1987.
- [Max54a] J. C. Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, volume I. Dover, New York, 1954. Republication complète de la troisième édition de 1891.
- [Max54b] J. C. Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Dover, New York, 1954. Deux volumes. Republication complète de la troisième édition de 1891.

- [MB17] B. A. Moura and T. Bonfim. Benjamin Franklin e a formação de temporais com raios e trovões: tradução comentada de uma carta a John Mitchel. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 34:460–478, 2017. Doi: 10.5007/2175-7941.2017v34n2p460.
- [MFsd] G. d. C. Marques and C. Furukawa, [s.d.]. Eletromagnetismo - Tema 2 - O potencial elétrico - Experimento 3: Máquina de indução: eletróforo de Volta. Cours en ligne de l'Université de São Paulo - USP, São Paulo, Brazil. <http://eaulas.usp.br/portal/home/video.action?idItem=5874>.
- [Mil17] R. A. Millikan. *The Electron: Its Isolation and Measurements and the Determination of Some of Its Properties*. The University of Chicago Press, Chicago, 1917. Édité avec une introduction par J. W. M. DuMond.
- [Mor04a] B. Morse. Pointy tab blunt tab. Electrostatic Video Series. Wright Center for Innovative Science Education. <https://www.youtube.com/watch?v=6pnXOHjYj00>, 2004.
- [Mor04b] R. A. Morse, 2004. Benjamin Franklin and Electrostatics. Homepage created and collected by R. A. Morse. <https://www.compadre.org/student/items/detail.cfm?ID=3383>.
- [MW08] L. S. McCarty and G. M. Whitesides. Electrostatic charging due to separation of ions at interfaces: contact electrification of ionic electrets. *Angewandte Chemie (International Edition)*, 47:2188–2207, 2008. Doi: 10.1002/anie.200701812.
- [MWW07] L. S. McCarty, A. Winkleman, and G. M. Whitesides. Ionic electrets: electrostatic charging of surfaces by transferring mobile ions upon contact. *Journal of the American Chemical Society*, 129:4075–4088, 2007. Doi: 10.1021/ja067301e.
- [Net94] L. F. Netto. Eletreto (o ímã da eletrostática). <http://web.archive.org/web/20181014170944/http://www.feiradeciencias.com.br>, 1994.
- [Netsd] L. F. Netto. Feira de ciências. <http://web.archive.org/web/20181014170944/http://www.feiradeciencias.com.br>, [s.d.].
- [New34] I. Newton. *Mathematical Principles of Natural Philosophy*. University of California Press, Berkeley, 1934. Cajori edition.
- [New52] I. Newton. *Mathematical Principles of Natural Philosophy*, volume 34, pp. 1–372 of *Great Books of the Western World*. Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952. Traduit par A. Motte et révisé par F. Cajori.

- [New90] I. Newton. *Principia — Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*. Nova Stella/Edusp, São Paulo, 1990. Livro I: O Movimento dos Corpos. Traduction portugaise par T. Ricci, L. G. Brunet, S. T. Gehring et M. H. C. Célia.
- [New90a] I. Newton. *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*. Tome I. Éditions Jacques Gabay, Sceaux, France, 1990. Traduit par feu Madame la Marquise du Chastellet. Réimpression de la publication de 1759.
- [New99] I. Newton. *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*. University of California Press, Berkeley, 1999. A new translation by I. B. Cohen and A. Whitman, assisted by J. Budenz.
- [New08] I. Newton. *Principia — Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*. Edusp, São Paulo, 2008. Livro II: O Movimento dos Corpos (em Meios com Resistência). Livro III: O Sistema do Mundo (Tratado Matematicamente). Traduction portugaise par A. K. T. Assis.
- [New10] I. Newton. *Principia — Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*. Folha de São Paulo, São Paulo, 2010. Livro III: O Sistema do Mundo (Tratado Matematicamente). Coleção Folha de São Paulo: Livros que Mudaram o Mundo, volume 9. Traduction portugaise par A. K. T. Assis.
- [Nol46] Abbé Nollet. Observations Sur quelques nouveaux phénomènes d'Électricité. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pp. 1–23, 1746.
- [Oer20a] H. C. Oersted. Expériences sur l'effet du conflict électrique sur l'aiguille aimantée. *Annales de Chimie et de Physique*, 14:417–425, 1820.
- [Oer20b] H. C. Oersted. Experiments on the effect of a current of electricity on the magnetic needle. *Annals of Philosophy*, 16:273–277, 1820. Translated from a printed account drawn up in Latin by the author and transmitted by him to the Editor of the *Annals of Philosophy*. Réimprimé dans *Selected Works of Hans Christian Ørsted* (Princeton, Princeton University Press, 1998), traduit et édité par K. Jøved, A. D. Jackson et O. Knudsen.
- [Oer65] H. C. Oersted. Experiments on the effect of a current of electricity on the magnetic needle. In R. A. R. Tricker, *Early Electrodynamics — The First Law of Circulation*, pp. 113–117, New York, 1965. Pergamon. Translation from Thomson's *Annals of Philosophy*, October 1820. Translated from a printed account drawn up in Latin by the author and transmitted by him to the Editor of the *Annals of Philosophy*.
- [OF38] G. S. Ohm and G. T. Fechner. *Das Grundgesetz des elektrischen Stromes*, volume 244 of *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften*. Akad. Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1938. Drei Abhandlungen von Georg Simon Ohm (1825 und 1826) und Gustav Theodor Fechner (1829). Herausgegeben von C. Piel.

- [Ohm25] G. S. Ohm. Vorläufige Anzeige des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontakt-Elektrizität leiten. *Journal für Chemie und Physik*, 44:10–118, 1825. Réimprimé dans *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften*, Nr. 244, C. Piel (ed.), (Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1938), pp.1–7.
- [Ohm26] G. S. Ohm. Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontakt-Elektrizität leiten, nebst einem Entwurfe zu einer Theorie des Voltaschen Apparates und des Schweiggerschen Multiplikators. *Journal für Chemie und Physik*, 46:137–166, 1826. Réimprimé dans *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften*, Nr. 244, C. Piel (ed.), (Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1938), pp. 8–29.
- [Ohm66] G. S. Ohm. The galvanic circuit investigated mathematically. In R. Taylor, éditeur, *Scientific Memoirs*, volume 2, pp. 401–506, New York, 1966. Johnson Reprint Corporation. Traduction anglaise par W. Francis.
- [OP09] K. Ovchinnikova and G. H. Pollack. Can water store charge? *Langmuir*, 25:542–547, 2009. Doi: 10.1021/la802430k.
- [Ørs86] H. C. Ørsted. Experiências sobre o efeito do conflito elétrico sobre a agulha magnética. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 10:115–122, 1986. Traduit par R. d. A. Martins.
- [Per44] E. Perucca. *Física General y Experimental*, volume II: Optica, Electricidad y Magnetismo. Editorial Labor, Barcelona, 1944. Traduit de la quatrième édition italienne par J. Melis et J. M. V. Llenas.
- [Pla52] Plato. *Timaeus*. In *Great Books of the Western World*, R. M. Hutchins, Editor in Chief, volume 7, pp. 442–477, Chicago, 1952. Encyclopaedia Britannica. Traduit par B. Jowett.
- [Pla09] Platao. *Timeu e Crítias ou A Atlântida*. Hemus, São Paulo, 2009. Traduction portugaise par N. d. P. Lima.
- [Pol13] G. H. Pollack. *The Fourth Phase of Water: Beyond Solid, Liquid, and Vapor*. Ebner & Sons, Seattle, 2013.
- [Pot84] A. Potier. *Collection de Mémoires relatifs à la Physique*, volume 1: *Mémoires de Coulomb*. Gauthiers-Villars, Paris, 1884.
- [Pri75] J. Priestley. *The History and Present State of Electricity, with Original Experiments*, volume II. C. Bathurst and T. Lowndes, London, 3rd edition, 1775.
- [Pri66] J. Priestley. *The History and Present State of Electricity*, volume 2. Johnson Reprint Corporation, New York, 1966. The Sources of Science, Number 18. Réimprimé dans la troisième édition, London, 1775.
- [Rai15] A. C. Raicik. Experimentos exploratórios: os contextos da descoberta e da justificativa nos trabalhos de Gray e Du Fay. Thèse de maîtrise, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, Brazil, 2015.

- [Ram53] C. Ramsauer, 1953. Das Ohmsche Gesetz (1826), in C. Ramsauer, *Grundversuche der Physik in historischer Darstellung* (Springer, Berlin, 1953), volume 1: Von der Fallgesetzen bis zu den elektrischen Wellen.
- [Roc89] J. Roche. Applying the history of electricity in the classroom: a reconstruction of the concept of ‘potential’. In M. Shortland and A. Warwick, éditeurs, *Teaching the History of Science*, pp. 168–184. Basil Blackwell, Oxford, 1989.
- [Ros90] F. Rosenberger. *Die Geschichte der Physik*, volume 3. Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1887–1890.
- [Ros57] L. Rosenfeld. The velocity of light and the evolution of electrodynamics. *Il Nuovo Cimento*, Supplement to vol. 4:1630–1669, 1957. Réimprimé dans Cohen, R. S. and Stachel, J. J. (eds.), *Selected Papers of Léon Rosenfeld*. Boston Studies in the Philosophy of Science, volume. 21. Springer, Dordrecht, Chapter 14, pp. 134–177.
- [Ros81] L. Rosenfeld. Kirchhoff, Gustav Robert. In C. C. Gillispie, éditeur, *Dictionary of Scientific Biography*, volume 7, pp. 379–383, New York, 1981. Charles Scribner’s Sons.
- [RP13a] A. C. Raicik and L. O. Q. Peduzzi, 2013. Uma abordagem histórica e experimental à eletricidade em uma disciplina sobre a evolução dos conceitos da física. Anais do XX Simpósio Nacional de Ensino de Física - SNEF, São Paulo, SP. pp. 1–8.
- [RP13b] A. C. Raicik and L. O. Q. Peduzzi, 2013. Uma discussão sobre os contextos da descoberta e da justificativa nos estudos de Du Fay. Anais do IX Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências - IX ENPEC, Águas de Lindóia, SP, 10 a 14 de novembro. pp. 1–8.
- [RP13c] A. C. Raicik and L. O. Q. Peduzzi, 2013. Uma análise da terminologia *descoberta* e sua contextualização nos livros didáticos: os estudos de Gray e Du Fay. Anais do V Encontro Estadual de Ensino de Física, Porto Alegre, RS. pp. 1–13.
- [RP15a] A. C. Raicik and L. O. Q. Peduzzi. Potencialidades e limitações de um módulo de ensino: uma discussão histórico-filosófica dos estudos de Gray e Du Fay. *Investigações em Ensino de Ciências*, 20:138–160, 2015.
- [RP15b] A. C. Raicik and L. O. Q. Peduzzi. Um resgate histórico e filosófico dos estudos de Charles Du Fay. *Revista Ensaio*, 17:105–125, 2015. Doi: 10.1590/1983-211720175170105.
- [RP16] A. C. Raicik and L. O. Q. Peduzzi. A estrutura conceitual e epistemológica de uma descoberta científica: reflexões para o ensino de ciências. *Alexandria - Revista de Educação em Ciência e Tecnologia*, 9:149–176, 2016. Doi: 10.5007/1982-5153.2016v9n2p149.

- [RR57] D. Roller and D. H. D. Roller. The Development of the Concept of Electric Charge. In J. B. Conant, éditeur, *Harvard Case Studies in Experimental Science*, chapter 8, pp. 541–639. Harvard University Press, Cambridge, 1957.
- [San11] L. P. Santos *et al.* Water with excess electric charge. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115:11226–11232, 2011. Doi: 10.1021/jp202652q.
- [Sav89] I. V. Savelyev. *Physics: A General Course*, volume II: Electricity and Magnetism, Waves and Optics. Mir, Moscow, 1989. Traduit du russe par G. Leib.
- [Sch63] M. Schagrin. Resistance to Ohm’s law. *American Journal of Physics*, 31:536–547, 1963.
- [Sch07] L. B. Schein. Recent progress and continuing puzzles in electrostatics. *Science*, 316:1572–1573, 2007.
- [Sco59] W. T. Scott. Who was Earnshaw? *American Journal of Physics*, 27:418–419, 1959.
- [Ses87] G. M. Sessler (ed.). *Electrets*. Springer, Berlin, deuxième édition, 1987.
- [SGS31] J. B. Seth, B. Gulati, and S. Singh. On an electromotive force between two metals in relative motion. *Philosophical Magazine*, 12:409–429, 1931. Doi: 10.1080/14786443109461818.
- [Sil10a] V. A. Silva Júnior. Fabricação e aplicação de eletretos. Mémoire de fin d’études réalisé à l’Institut de Physique de l’Université de Campinas — UNICAMP, Brazil. Superviseur: A. K. T. Assis. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis> et https://sites.ifi.unicamp.br/lunazzi/files/2014/03/ValterA-Assis_RF1.pdf, 2010.
- [Sil10b] V. A. Silva Júnior. História e propriedades dos eletretos. Mémoire de fin d’études réalisé à l’Institut de Physique de l’Université de Campinas — UNICAMP, Brazil. Superviseur: A. K. T. Assis. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>, 2010.
- [Sil10c] F. L. d. Silveira. Resenha - Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 27:411–415, 2010. <https://www.researchgate.net/publication/315130099>.
- [Sil11] F. L. d. Silveira. Video in Portuguese on electrostatic experiments. <https://www.if.ufrgs.br/~lang> et <https://www.youtube.com/watch?v=GhYKeb990gA>, 2011.
- [Sil16] F. L. d. Silveira. Descarga elétrica através do ar NÃO é consequente do arrancamento de elétrons dos eletrodos! <https://www.if.ufrgs.br/cref/?area=questions&id=1652>, 2016.

- [SP06] C. C. Silva and A. C. Pimentel, 2006. Benjamin Franklin e a história da eletricidade em livros didáticos. Proceedings of the X Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, Londrina, PR, Brazil, 15 to 19/08/2006. <https://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/x/sys/resumos/T0150-1.pdf>.
- [SP08] C. C. Silva and A. C. Pimentel. Uma análise da história da eletricidade presente em livros didáticos: o caso de Benjamin Franklin. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 25:141–159, 2008.
- [Tho68] W. Thomson. On a self-acting apparatus for multiplying and maintaining electric charges, with applications to illustrate the voltaic theory. *Proceedings of the Royal Society of London*, 16:67–72, 1867–1868.
- [Tho84a] W. Thomson. Atmospheric electricity. In W. Thomson, éditeur, *Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism*, pp. 192–239. Macmillan, London, 2^e édition, 1884. Article XVI. Réimprimé dans Nichol’s *Cyclopaedia*, 2^e édition, 1860.
- [Tho84b] W. Thomson. A mathematical theory of magnetism. In W. Thomson, éditeur, *Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism*, pp. 345–430. Macmillan, London, 2^e édition, 1884. Article XXIV. Réimprimé dans *Philosophical Transactions*, volume 141, pp. 243–268 et 269–285 (1851).
- [Tho84c] W. Thomson. Measurement of the electromotive force required to produce a spark in air between parallel metal plates at different distances. In W. Thomson, éditeur, *Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism*, pp. 247–259. Macmillan, London, 2^e édition, 1884. Article XIX. Réimprimé dans *Proceedings of the Royal Society*, volume 10, pp. 326–338 (1860).
- [Tho84d] W. Thomson. On the mathematical theory of electricity in equilibrium. In W. Thomson, éditeur, *Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism*, pp. 42–68. Macmillan, London, 2^e édition, 1884. Articles IV (pp. 42–51) et V (pp. 52–68). Réimprimé dans *Cambridge and Dublin Mathematical Journal*, volume 3, pp. 131–148 et 266–274 (1848).
- [Tho21] J. J. Thomson. *Elements of the Mathematical Theory of Electricity and Magnetism*. Cambridge University Press, Cambridge, 5^e édition, 1921.
- [TM09] P. A. Tipler and G. Mosca. *Física para Cientistas e Engenheiros*, volume 2: Eletricidade e Magnetismo, Óptica. LTC, Rio de Janeiro, 6^e édition, 2009. Traduction portugaise par N. M. Balzaretta.
- [TP11] J. D. M. Tamayo and M. G. T. Palacio. *El Papel del Experimento en la Construcción del Conocimiento Físico, el Caso de la Construcción del Potencial Eléctrico como una Magnitude Física. Elementos para Propuestas en la Formación Inicial y Continuada de Profesores de Física*. Universidad de Antioquia - Facultad de Educación, Medellín, 2011. Trabajo de Investigación como requisito parcial para optar al título de Magister en Educación, línea de Educación en Ciencias Experimentales. Director: A. E. R. Chacón.

- [Vas05] G. M. S. Vasconcelos. Experimentos de eletrostática de baixo custo para o ensino médio. Mémoire de fin d'études réalisé à l'Institut de Physique de l'Université de Campinas — UNICAMP, Brazil. Superviseur: A. K. T. Assis. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis> et https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2005/GeraldoM_Assis_RF1.pdf, 2005.
- [VF80] R. N. Varney and L. H. Fisher. Electromotive force: Volta's forgotten concept. *American Journal of Physics*, 48:405–408, 1980.
- [Vol00a] A. Volta. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. *Philosophical Transactions*, 90:403–431, 1800. Letter in French from A. Volta to J. Banks dated March 20, 1800. It was read before the Royal Society in June 26, 1800.
- [Vol00b] A. Volta. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. *Philosophical Magazine*, 7:289–311, 1800.
- [Vol64] A. Volta. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. In B. Dibner, *Alessandro Volta and the Electric Battery*, pp. 111–131. Franklin Watts, New York, 1964. Translated from the author's paper published in French in the *Philosophical Transactions* for 1800, Part 2.
- [WB09] B. Wolff and C. Blondel. La balance électrique de Coulomb pouvait-elle constituer sa propre cage de Faraday? <https://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique>, 2009.
- [WB11] B. Wolff and C. Blondel. Quelques questions encore posées aujourd'hui par l'histoire de l'électrostatique. *Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, 105:705–717, 2011.
- [Web46] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen — Über ein allgemeines Grundgesetz der elektrischen Wirkung. *Abhandlungen bei Begründung der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften am Tage der zweihundertjährigen Geburtstagfeier Leibnizens's herausgegeben von der Fürstlich Jablonowskischen Gesellschaft (Leipzig)*, pp. 211–378, 1846. Réimprimé dans *Wilhelm Weber's Werke*, volume 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 25–214.
- [Web48] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen. *Annalen der Physik und Chemie*, 73:193–240, 1848. Réimprimé dans *Wilhelm Weber's Werke*, volume 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 215–254.
- [Web52a] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über Diamagnetismus. *Abhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physischen Classe*, 1:485–577, 1852. Réimprimé dans *Wilhelm Weber's Werke*, volume 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 473–554.

- [Web52b] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Widerstandsmessungen. *Abhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physischen Classe*, 1:199–381, 1852. Réimprimé dans *Wilhelm Weber's Werke*, volume 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 301–471.
- [Web64] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über elektrische Schwingungen. *Abhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physischen Classe*, 6:571–716, 1864. Réimprimé dans *Wilhelm Weber's Werke*, volume 4, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1894), pp. 105–241.
- [Web71] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über das Princip der Erhaltung der Energie. *Abhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physischen Classe*, 10:1–61, 1871. Réimprimé dans *Wilhelm Weber's Werke*, volume 4, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1894), pp. 247–299.
- [Web72] W. Weber. Electrodynamical measurements — Sixth memoir, relating specially to the principle of the conservation of energy. *Philosophical Magazine*, 43:1–20 and 119–149, 1872. Translated by Professor G. C. Foster, F.R.S., from the *Abhandlungen der mathem.-phys. Classe der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften*, volume X (January 1871).
- [Web78] W. Weber. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über die Energie der Wechselwirkung. *Abhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, mathematisch-physischen Classe*, 11:641–696, 1878. Réimprimé dans *Wilhelm Weber's Werke*, volume 4, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1894), pp. 361–412.
- [Web92a] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke*, E. Riecke (ed.), volume 2, *Magnetismus*. Springer, Berlin, 1892. <http://archive.org/details/wilhelmweberswe01fiscgoog>.
- [Web92b] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke*, W. Voigt, (ed.), volume 1, *Akustik, Mechanik, Optik und Wärmelehre*. Springer, Berlin, 1892.
- [Web93a] H. Weber. *Wilhelm Weber — Eine Lebensskizze*. Eduard Trewendt, Breslau, 1893. https://books.google.de/books/about/Wilhelm_Weber.html?id=pu3mpnrYpuUC&redir_esc=y.
- [Web93b] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke*, H. Weber (ed.), volume 3, *Galvanismus und Elektrodynamik*, première partie. Springer, Berlin, 1893. <http://archive.org/details/wilhelmweberswe02fiscgoog>.
- [Web94a] W. Weber. Aphorismen. In H. Weber, éditeur, *Wilhelm Weber's Werke*, volume 4, pp. 630–632, Berlin, 1894. Springer.

- [Web94b] W. Weber. Ueber die Einrichtung des Bifilargalvanometers. In H. Weber, éditeur, *Wilhelm Weber's Werke*, volume 4, pp. 584–615, Berlin, 1894. Springer.
- [Web94c] W. Weber. *Wilhelm Weber's Werke*, H. Weber, (ed.), volume 4, *Galvanismus und Elektrodynamik*, deuxième partie. Springer, Berlin, 1894.
- [Web66] W. Weber. On the measurement of electro-dynamic forces. In R. Taylor, éditeur, *Scientific Memoirs*, volume 5, pp. 489–529, New York, 1966. Johnson Reprint Corporation.
- [Web07] W. Weber, 2007. Determinations of electrodynamic measure: concerning a universal law of electrical action, *21st Century Science & Technology*, posted March 2007, translated by S. P. Johnson, edited by L. Hecht and A. K. T. Assis. <http://21sci-tech.com/translation.html> et <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Web08] W. Weber, 2008. Determinations of electrodynamic measure: particularly in respect to the connection of the fundamental laws of electricity with the law of gravitation, *21st Century Science & Technology*, posted November 2008, translated by G. Gregory, edited by L. Hecht and A. K. T. Assis. <http://21sci-tech.com/translation.html> et <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Whe43] C. Wheatstone. An account of several new instruments and processes for determining the constants of a voltaic circuit. *Philosophical Transactions*, 133:303–327, 1843.
- [Whi73a] E. T. Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*, volume 1: *The Classical Theories*. Humanities Press, New York, 1973.
- [Whi73b] E. T. Whittaker. *A History of the Theories of Aether and Electricity*, volume 2: *The Modern Theories*. Humanities Press, New York, 1973.
- [Wie60] K. H. Wiederkehr. Wilhelm Webers Stellung in der Entwicklung der Elektrizitätslehre. Dissertation, Universität Hamburg, 1960.
- [Wie67] K. H. Wiederkehr. *Wilhelm Eduard Weber — Erforscher der Wellenbewegung und der Elektrizität (1804–1891)*, volume 32 of *Grosse Naturforscher*, H. Degen (ed.). Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 1967.
- [Wil12] M. W. Williams. What creates static electricity? *American Scientist*, 100:316–323, 2012. Doi: 10.1511/2012.97.316.
- [Wis81] M. N. Wise. German concepts of force, energy, and the electromagnetic ether: 1845–1880. In G. N. Cantor and M. J. S. Hodge, éditeurs, *Conceptions of Ether — Studies in the History of Ether Theories 1740–1900*, pp. 269–307, Cambridge, 1981. Cambridge University Press.

- [WK56] W. Weber and R. Kohlrausch. Über die Elektrizitätsmenge, welche bei galvanischen Strömen durch den Querschnitt der Kette fließt. *Annalen der Physik und Chemie*, J. C. Poggendorff (ed.), 99:10–25, 1856. Réimprimé dans *Wilhelm Weber's Werke*, volume 3, H. Weber (ed.), (Springer, Berlin, 1893), pp. 597–608.
- [WK08] W. Weber and R. Kohlrausch. Sobre a quantidade de eletricidade que flui através da seção reta do circuito em correntes galvânicas. *Revista Brasileira de História da Ciência*, 1:94–102, 2008. Traduction portugaise par A. K. T. Assis.
- [Woo68] A. E. Woodruff. The contributions of Hermann von Helmholtz to electrodynamics. *Isis*, 59:300–311, 1968.
- [Woo81] A. E. Woodruff. Weber, Wilhelm Eduard. In C. C. Gillispie, éditeur, *Dictionary of Scientific Biography*, volume 14, pp. 203–209, New York, 1981. Charles Scribner's Sons.

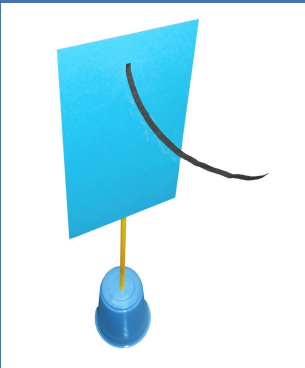
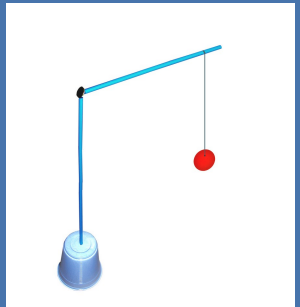
Le volume 2 du texte Les fondements expérimentaux et historiques de l'électricité traite des aspects les plus fondamentaux de la physique. Cet ouvrage décrit les principales expériences et découvertes de l'histoire de l'électricité. Il traite des attractions et des répulsions, des charges positives et négatives, des conducteurs et des isolants, de l'électrification par frottement, par contact ou par induction, de la série triboélectrique, de l'électrification des rubans adhésifs, de l'équilibre et de la répartition des charges dans les conducteurs, du blindage électrique, de l'effet de pointe, des étincelles et des décharges électriques dans l'air, des électrets et de la conservation temporaire de l'électrification des corps.



Cet ouvrage explique comment construire plusieurs instruments : le versorium, le pendule électrique, l'électroscope, le collecteur de charges, le testeur de circuit, l'électrophore, la bouteille de Leyde et les condensateurs, etc. Toutes les expériences sont clairement décrites et réalisées avec des matériaux simples et peu coûteux. Ces expériences mènent à des concepts, des définitions et des lois clairs décrivant ces phénomènes. Les aspects historiques sont présentés, accompagnés de citations pertinentes des principaux scientifiques. Une vaste bibliographie est incluse à la fin de l'ouvrage.

À propos de l'auteur

André Koch Torres Assis est né au Brésil en 1962. Il a obtenu son doctorat en physique en 1987. Il travaille à l'Institut de physique de l'Université de Campinas (UNICAMP) depuis 1989. Il a occupé des postes de post-doctorat au Laboratoire de Culham (Autorité britannique de l'énergie atomique, Oxfordshire, Angleterre, de 1988 à 1989), à l'Université Northeastern (Boston, États-Unis, de 1991 à 1992), à l'Université de Hambourg (Allemagne, de 2001 à 2002 et également en 2009), à l'Université technique de Dresde (Allemagne, 2014) et à l'Université d'Augsbourg (Allemagne, 2023).



Ses quatre séjours en Allemagne ont été financés par des bourses de recherche Humboldt accordées par la Fondation Alexander von Humboldt d'Allemagne. Il a publié plus de 30 ouvrages sur l'électrodynamique de Weber ; les calculs d'inductance et de force dans les circuits électriques ; les principaux travaux de Wilhelm Weber sur l'électrodynamique traduits en anglais ; Archimède, le centre de gravité et la loi du levier ; le modèle planétaire de l'atome de Weber ; la méthode d'Archimède ; la force électrique d'un courant ; l'électrodynamique d'Ampère ; les mémoires de Coulomb sur la torsion, l'électricité et le magnétisme traduits en anglais ; et la mécanique relationnelle et l'application du principe de Mach à la force gravitationnelle de Weber. Page d'accueil : <https://www.ifi.unicamp.br/-assis>

ISBN 978-1-9879804-9-3

