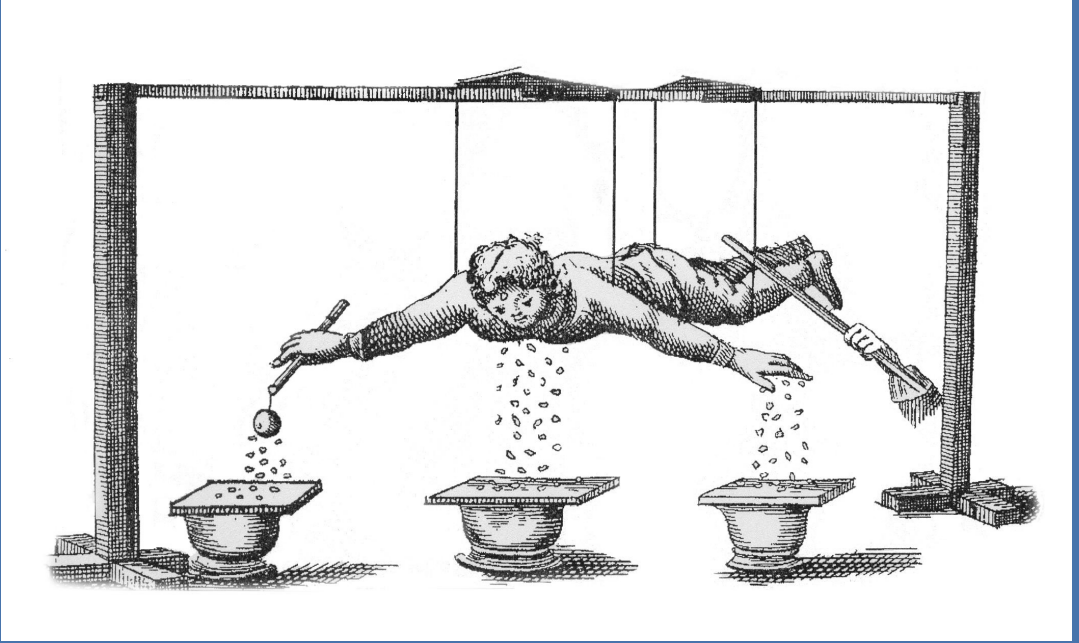


Andre Koch Torres Assis



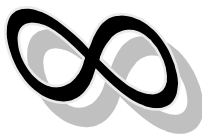
Les fondements
expérimentaux et historiques
de l'électricité

Volume I

Les Fondements Expérimentaux et Historiques de l'Électricité

Volume I

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 9781987980479 (couverture souple ; vol. 1) | ISBN 9781987980486 (PDF ; vol. 1)

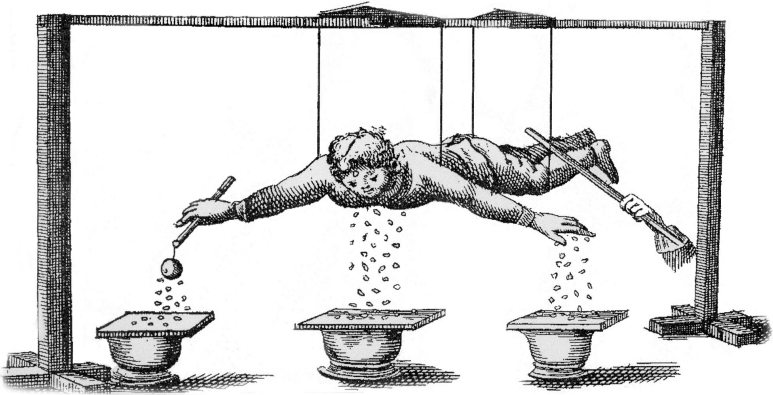
Vedettes-matière: RVM: Électricité—Expériences. | RVM: Électricité—Histoire.

Classification: LCC QC533 .A8814 2026 | CDD 537.078—dc23

Illustration de couverture : L'expérience de Stephen Gray (1666-1736) avec le garçon suspendu (1731), telle que représentée dans l'ouvrage de Johann Gabriel Doppelmayr, *Neu-entdeckte Phänomene von Bewundernswürdigen Wirkungen der Natur*, Nuremberg, 1774. Un garçon est suspendu par des fils isolants. Un tube de verre frotté est approché de ses jambes. Les mains et le visage du garçon attirent des corps légers.

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



ANDRE KOCH TORRES ASSIS

Traduit par JOHN PLAICE

© Andre Koch Torres Assis

Table des matières

Préface du traducteur	vii
Présentation et remerciements	ix
1 Introduction	1
2 L'électrisation par friction	5
2.1 Les débuts de l'étude de l'électricité	5
2.2 L'effet de l'ambre	7
2.3 Explorer l'attraction exercée par des corps frottés	10
2.4 Quels corps sont attirés par le plastique frotté ?	11
2.5 Est-il possible d'attirer des liquides ?	13
2.6 Gilbert et certaines de ses expériences électriques	15
2.7 Quelles substances frottées attirent les corps légers ?	18
2.8 La nomenclature de Gilbert : les corps électriques et non électriques	19
3 Le versorium	23
3.1 Le perpendiculaire de Fracastoro et le versorium de Gilbert	23
3.2 Fabriquer un versorium	26
3.2.1 Versorium du premier type	26
3.2.2 Versorium du second type	27
3.2.3 Versorium du troisième type	30
3.3 Expériences avec le versorium	31
3.4 Est-il possible de cartographier la force électrique ?	33
3.5 Y a-t-il action et réaction en électrostatique ?	36
3.6 Fabri et Boyle découvrent l'action électrique mutuelle	41
3.7 Newton et l'électricité	46
4 L'attraction et la répulsion électriques	51
4.1 Existe-t-il une répulsion électrique ?	51
4.2 L'expérience de Guericke avec une plume de duvet flottante	54
4.3 Du Fay reconnaît la répulsion électrique comme un phénomène réel	61
4.4 Le pendule électrique	63
4.5 Décharge par mise à terre	68
4.6 Le pendule électrique de Gray	70

4.7	Le versorium de Du Fay	70
4.8	Le mécanisme ACR	74
4.9	Le fil pendulaire de Gray	77
4.10	La cartographie de la force électrique	79
4.11	Hauksbee et la cartographie des forces électriques	83
5	Les charges positives et négatives	87
5.1	Existe-t-il un seul type de charge?	87
5.2	Du Fay découvre deux types d'électricité	98
5.3	Quel type de charge un corps acquiert-il par frottement?	102
5.4	La série triboélectrique	110
5.5	Les attractions et les répulsions sont-elles aussi fréquentes?	115
5.6	Variation de la force électrique en fonction de la distance	116
5.7	Variation de la force électrique avec la quantité de charge	118
6	Les conducteurs et les isolants	125
6.1	L'électroscope	125
6.2	Expériences avec l'électroscope	128
6.3	Quels corps déchargent un électroscope par contact?	134
6.3.1	Définitions des conducteurs et des isolants	134
6.3.2	Corps qui se comportent comme des conducteurs et des isolants dans les expériences habituelles d'électrostatique	138
6.4	Quels corps chargent un électroscope par contact?	140
6.5	Les composants fondamentaux d'un versorium, d'un pendule électrique et d'un électroscope	142
6.6	L'influence de la différence de potentiel électrique sur le comportement conducteur ou isolant d'un corps	143
6.6.1	Substances qui se comportent comme des conducteurs et des isolants pour de faibles différences de potentiel	147
6.7	Autres aspects qui influencent les propriétés conductrices et isolantes d'une substance	148
6.7.1	Le temps nécessaire pour décharger un électroscope électrisé	149
6.7.2	La longueur d'une substance qui entre en contact avec un électroscope électrisé	149
6.7.3	La section transversale d'une substance qui entre en contact avec un électroscope électrisé	150
6.8	L'électrisation d'un conducteur par friction	151
6.9	La conservation de la charge électrique	152
6.10	Gray et la conservation des charges électriques	156
6.11	Une brève histoire de l'électroscope et de l'électromètre	157
7	Les différences entre les conducteurs et les isolants	165
7.1	La mobilité des charges sur les conducteurs et les isolants	165
7.2	Les collecteurs de charge	167
7.3	La polarisation électrique des conducteurs	169
7.3.1	Aepinus et la polarisation électrique	173

7.4	Les attractions et les répulsions exercées par un corps polarisé	175
7.5	L'utilisation de la polarisation pour charger un électroscope	179
7.5.1	Premier procédé d'électrisation par induction	179
7.5.2	Deuxième procédé d'électrisation par induction	181
7.5.3	Troisième procédé d'électrisation par induction	183
7.6	La polarisation électrique des isolants	184
7.7	Un corps électrisé attire-t-il davantage un conducteur ou un isolant ?	186
7.7.1	Discussion sur le pendule électrique de Gray	189
7.8	Forces d'origine non électrostatique	190
7.9	Modèles microscopiques des conducteurs et des isolants	191
7.10	Deux corps chargés électriquement de signes opposés peuvent-ils s'attirer ?	193
7.11	La conductivité de l'eau	197
7.12	Est-il possible d'électriser l'eau ?	199
7.12.1	Le générateur électrostatique de Kelvin	200
7.13	La conductivité de l'air	203
7.14	Comment décharger un isolant électrisé ?	204
7.15	Un petit morceau de papier est-il attiré avec une force plus importante lorsqu'il se trouve au-dessus d'un isolant ou d'un conducteur ?	207
8	Considérations finales	211
8.1	Changement de noms et de significations : des corps électriques et non électriques aux isolants et conducteurs	211
8.2	Faits simples et élémentaires sur l'électricité	212
8.3	Description de l'effet de l'ambre	215
A	Définitions	223
B	Stephen Gray et la découverte de la conduction électrique	225
B.1	Le générateur électrique de Gray	226
B.2	La découverte de l'électrisation par la communication	228
B.3	L'exploration de la découverte et la révélation de l'électricité cachée des métaux	231
B.4	Gray découvre les conducteurs et les isolants	233
B.5	La découverte que ce qui fait qu'un corps se comporte comme un conducteur ou comme un isolant dépend de ses propriétés intrinsèques	238
B.6	La découverte que l'électrisation par la communication se produit à distance	240
B.7	L'expérience avec le garçon suspendu	244
B.8	La découverte que les charges libres sont réparties sur la surface des conducteurs	247
B.9	La découverte de l'effet de pointe	248
B.10	Conclusions	249
	Bibliographie	251

Préface du traducteur

Cet ouvrage est la traduction française du premier 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 serait bienvenue ! »⁴ J'espère donc que cette traduction dans la langue de Racine puisse être d'une utilité pour les jeunes scientifiques de la Francophonie.

Je voudrais dédier la traduction de ce volume à ma feuée sœur, Lynn Frances Plaiçe, à ma feuée mère, Helen Mary Plaiçe—toutes les deux traductrices travaillant à Montréal—et à mon père, Jack Lawrence Plaiçe, toujours vivant à 101 ans. Ce fut la décision de mes parents de nous scolariser en français qui m'a permis de grandir bilingue.

John Plaiçe, Bogotá, mars 2026

<https://johnplaiçe.substack.com>

¹Le premier volume a été publié en anglais, portugais, italien et russe : [Ass10a], [Ass10b], [Ass15] 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

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. Lors 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*.¹ 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.² 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*.³ J'ai également beaucoup appris de son livre ainsi que de ses autres ouvrages.⁴

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

¹[FM91].

²[Fer78], [Fer dd], [Fer db], [Fer dc], [Fer da], [Fer06], [Fer01c], [Fer01d], [Fer01b] et [Fer01a].

³[Gas03].

⁴[Gas91] et [Gas96].

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.⁵

John L. Heilbron a suggéré des améliorations pertinentes dans la première version de ce volume. Son excellent livre, *Electricity in the 17th and 18th Centuries: A Study in Early Modern Physics*,⁶ a été ma principale source d'informations historiques sur l'électrostatique. De nombreuses suggestions importantes pour améliorer une version antérieure de cet ouvrage ont également été formulées par Sérgio Luiz Bragatto Boss, John Eichler, Steve Hutcheon, Fabio Miguel de Matos Ravanelli et Bertrand Wolff.

Les illustrations 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 obtenir d'anciennes illustrations et références.

Je tiens également à remercier plusieurs autres personnes pour leurs suggestions, leurs discussions et leurs références : Christine Blondel, Paolo Brenni, João José Caluzi, Juliano Camillo, Hugo Bonette de Carvalho, João Paulo Martins de Castro Chaib, Asit Choudhuri, Roberto Clemente, Junichiro Fukai, Hans Gaab, Robert Harry van Gent, Harald Goldbeck-Löwe, Jürgen Gottschalk, Peter Heering, Elizabeth Ihrig, John Jenkins, Siegfried Kett, Ellen Kuhfeld, Wolfgang Lange, Lin Liu, José Joaquín Lunazzi, Ceno Pietro Magnaghi, Eduardo Meirelles, Mahmoud Melehy, Dennis Nawrath, Marcos Cesar Danhoni Neves, Horst Nowacki, Martin Panusch, José Rafael Boesso Perez, Karin Reich, Edson Eduardo Reinehr, Ricardo Rodrigues, Waldyr Alves Rodrigues Jr., Torsten Rütting, Dirceu Tadeu do Espírito Santo, Wayne M. Saslow, Fernando Lang da Silveira, Moacir Pereira de Souza Filho, Christian Ucke, Alvaro Vannucci, Geraldo Magela Severino Vasconcelos, Greg Volk, Karl-Heinrich Wiederkehr, 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.

⁵[Net].

⁶[Hei99].

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

L'un des objectifs de cet ouvrage est de présenter les phénomènes fondamentaux de l'électricité à travers des expériences simples réalisées avec du matériel peu coûteux. Nous décrivons des expériences sur l'attraction et la répulsion, nous montrons comment charger des corps par frottement, contact ou induction, nous analysons les différentes propriétés des conducteurs et des isolants, etc. De plus, nous montrons comment les concepts théoriques se sont formés et modifiés au cours de ce processus, tout comme les lois fondamentales décrivant ces phénomènes.

Nous illustrons ensuite comment des phénomènes plus complexes peuvent être compris et clarifiés à partir des expériences élémentaires précédentes. Quelques expériences ludiques et curieuses sont également présentées. Elles sont conçues pour stimuler la créativité et l'esprit critique. Certaines cherchent également à relier des phénomènes quotidiens aux lois fondamentales de la physique.

L'accent est mis sur les activités expérimentales. À partir des expériences, nous formulons les définitions, les concepts, les postulats, les principes et les lois qui décrivent les phénomènes. Le matériel utilisé est très simple, facile à trouver à la maison ou dans le commerce, et peu coûteux. Néanmoins, il nous permet de réaliser des expériences précises et de construire des instruments scientifiques très sensibles. Le lecteur n'a donc pas besoin de dépendre d'un laboratoire d'école ou de recherche, car il construira son propre matériel et effectuera toutes les mesures. Pour l'aider à atteindre cet objectif, nous présentons plusieurs montages différents pour chaque instrument et plusieurs façons d'effectuer les mesures.

Une autre motivation importante que nous avons à l'esprit avant d'écrire ce livre était d'offrir aux enseignants et aux étudiants les principaux outils pour atteindre l'autonomie scientifique. Pour ce faire, nous citons des extraits des travaux les plus importants des scientifiques qui ont fait de grandes découvertes fondamentales dans le domaine de l'électricité. Nous montrons également comment réaliser des expériences illustrant leurs découvertes à l'aide d'instruments peu coûteux. Nous espérons ainsi que les lecteurs acquerront une indépendance scientifique à plusieurs égards : comment construire des instruments, comment effectuer des mesures, comment formuler des concepts et des théories pour clarifier ou expliquer leurs découvertes, etc.

Si les expériences présentées ici sont réalisées en classe, chaque élève doit

effectuer les activités et construire son propre matériel (électroscope, versorium,¹ pendule électrique). Les élèves doivent emporter tout ce matériel personnel chez eux. Cette procédure est beaucoup plus enrichissante que lorsque les expériences sont simplement démontrées par l'enseignant, les élèves ne mettant généralement pas la main à la pâte. Nous pensons que la science pratique est l'une des techniques d'apprentissage les plus efficaces.

Au-delà de la partie expérimentale, cet ouvrage est également riche en informations historiques, qui fournissent le contexte dans lequel certains phénomènes et certaines lois ont vu le jour. Il propose également différentes interprétations de ces faits observés. Un soin particulier a été apporté à la formulation et à l'énoncé des concepts et des principes physiques abordés. Nous essayons d'être prudents dans le choix des mots, en nous efforçant de distinguer clairement les définitions, les postulats et les résultats expérimentaux. Nous distinguons également la description de l'explication d'un phénomène. L'objectif est d'illustrer les éléments humains et sociologiques qui entrent dans la formulation des lois physiques. Nous ne suivons pas l'ordre chronologique des découvertes. Cependant, dans la mesure du possible, nous décrivons le contexte dans lequel chaque phénomène a été découvert et mentionnons également les principaux scientifiques qui ont participé à cette découverte. Les principales informations historiques présentées ici sont tirées des ouvrages originaux cités dans le texte ainsi que des excellents livres de Heilbron.² Notre objectif n'est pas de présenter les différentes explications et différents modèles théoriques qui ont été proposés au fil des siècles pour expliquer les phénomènes électriques. Les ouvrages de Heilbron constituent l'une des meilleures sources pour quiconque s'intéresse à ces aspects.

Afin de limiter la taille de cet ouvrage, nous avons choisi quelques thèmes spécifiques qui seront abordés plus en détail. Dans un prochain ouvrage, nous espérons aborder d'autres aspects importants de l'électricité en suivant une procédure similaire. Nous traiterons alors des étincelles et des décharges, de l'effet de pointe, du vent électrique, de l'électrophore de Volta, de la bouteille de Leyde, de la cage de Faraday, de Gray et de la conservation des charges électriques (la longévité de l'électrisation des objets, ou comment stocker l'électricité pendant longtemps), de la loi d'Ohm, des électrisations par contact, par roulement et par séparation, des générateurs de charges, des électrets, de la capacité et de la répartition des charges entre conducteurs, de l'électricité atmosphérique, des figures de Lichtenberg, etc.

Dans le présent ouvrage, nous montrons que de nombreuses questions fondamentales de la science peuvent être explorées à l'aide d'expériences, réalisées avec des matériaux très simples, qui ont néanmoins une grande importance historique ou conceptuelle. Tout au long du texte, nous montrons que certains des plus grands scientifiques de l'histoire se sont intéressés à ces phénomènes qui semblent aujourd'hui si simples et triviaux, mais qui recèlent en réalité des mystères très profonds.

Cet ouvrage est destiné aux enseignants et aux étudiants en physique, mathématiques, sciences et ingénierie. Il ne s'agit pas d'un livre d'expériences pour enfants. Il peut être utilisé dans les lycées ou les universités, en fonction du niveau d'analyse de chaque phénomène ou loi. Il contient des éléments expérimentaux et théoriques qui

¹Voir le chapitre 3.

²[Hei79], [Hei82], and [Hei99].

peuvent être appliqués à tous les niveaux d'enseignement. Chaque enseignant peut choisir les éléments présentés ici et les adapter à son environnement pédagogique. Cet ouvrage peut également être utilisé dans le cadre de cours d'histoire et de philosophie des sciences. Certaines parties de cet ouvrage peuvent même être utilisées au niveau postuniversitaire ou pour des recherches scientifiques plus approfondies.

La meilleure façon de suivre ce livre est de réaliser la plupart des expériences décrites ici au fur et à mesure de votre lecture, plutôt que de simplement lire le contenu. L'approche privilégiée consiste à essayer de reproduire, perfectionner et modifier ce qui est proposé ici. Bien que la physique comporte de nombreux aspects différents (philosophiques, théoriques et mathématiques), il s'agit essentiellement d'une science expérimentale. C'est la combinaison de tous ces aspects qui la rend si fascinante. Nous espérons que le lecteur éprouvera le même plaisir à réaliser ces expériences que nous avons eu à les concevoir.

Je serais ravi de recevoir des commentaires des lecteurs qui ont essayé de reproduire et de développer les expériences décrites ici, ou qui ont tenté de les appliquer dans leurs écoles et universités. J'aurais moi-même beaucoup apprécié d'apprendre la physique de cette manière. Au lieu d'apprendre plusieurs formules par cœur et de passer la plupart de mon temps à résoudre des exercices mathématiques, j'aurais préféré apprendre la physique de la manière présentée ici, en ayant l'occasion de construire des instruments et de réaliser diverses expériences, en apprenant dans la pratique comment des phénomènes importants ont été découverts et interprétés pour la première fois, et en reproduisant moi-même la plupart de ces effets avec des matériaux simples. Il serait également très intéressant d'explorer différents modèles et concepts théoriques afin d'expliquer ces phénomènes. Ce livre est notre contribution à l'amélioration de l'enseignement de la physique, à l'instar de ce que nous avons fait avec le concept du centre de gravité et la loi du levier.³ Nous espérons que la science pourra ainsi être présentée de manière plus concrète, riche en contexte historique, de manière à stimuler la créativité et l'esprit critique des élèves.

Je serais heureux que ce livre soit traduit dans d'autres langues. Ce serait formidable que les professeurs de physique recommandent cet ouvrage à leurs collègues et à leurs élèves. J'espère également qu'il motivera d'autres personnes à tenter une expérience similaire dans d'autres domaines scientifiques, en combinant des expériences réalisées avec du matériel accessible et des informations historiques liées au sujet traité.

Avant de commencer ces expériences, nous devons attirer l'attention du lecteur sur quelques points importants. Normalement, les expériences fonctionnent bien par temps froid et sec. Par temps humide, chaud ou pluvieux, de nombreux effets décrits ici peuvent ne pas être observés, ou les phénomènes peuvent être de faible intensité, ce qui les rend difficiles à observer. À plusieurs reprises dans le livre, nous citons des noms génériques de substances telles que le plastique, le verre, le bois ou le caoutchouc. Il faut toutefois garder à l'esprit qu'il existe en réalité de nombreuses variétés de plastique, de verre, de bois, de caoutchouc ou de toute autre substance. Ces variétés sont intrinsèquement différentes les unes des autres en raison de leur composition, de leur processus de fabrication, de leur âge, etc. Par conséquent, lorsqu'un effet

³[Ass08a] et [Ass08b].

spécifique n'est pas observé avec une certaine substance (avec un type de plastique spécifique, par exemple), il convient de répéter l'expérience avec une autre substance analogue pour voir ce qui se passe.

Les citations en français sont tirées des œuvres originales ou de traductions françaises citées ; sinon, elles ont été réalisées par nos soins. Les expressions entre crochets au milieu de certaines citations sont les nôtres et visent à clarifier le sens de certaines phrases.

Chapitre 2

L'électrisation par friction

2.1 Les débuts de l'étude de l'électricité

Expérience 2.1

Dans la première expérience, nous découpons plusieurs petits morceaux de papier et les plaçons sur une table. Nous prenons une paille en plastique et l'approchons des morceaux de papier, en prenant soin de ne pas toucher le papier. Il ne se passe rien, figure 2.1.

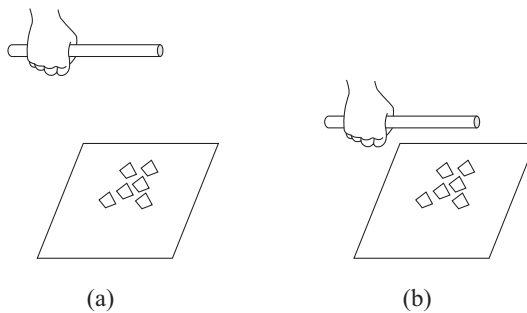


FIG. 2.1 : (a) Une paille en plastique loin de morceaux de papier. (b) Lorsque la paille en plastique est approchée des morceaux de papier, rien ne se passe.

Nous frottons maintenant la paille dans des cheveux ou avec une feuille de papier, en la déplaçant rapidement de haut en bas. Nous représentons la zone de la paille qui a été frottée par la lettre F , tirée du mot « friction », figure 2.2.

Nous approchons ensuite la paille frottée des petits morceaux de papier, sans les toucher, en restant très près. Nous observons qu'au-delà d'une certaine distance, ils sautent sur la paille frottée et y restent collés, figure 2.3. Lorsque nous éloignons la paille de la table, les morceaux de papier restent collés à la paille.

Tous les morceaux de papier ne restent pas attachés à la paille frottée. Certains

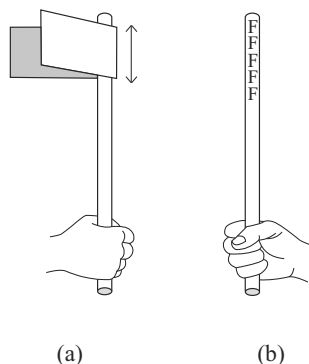


FIG. 2.2 : (a) Une paille en plastique frottée avec du papier. (b) La lettre F représente la zone frottée de la paille.

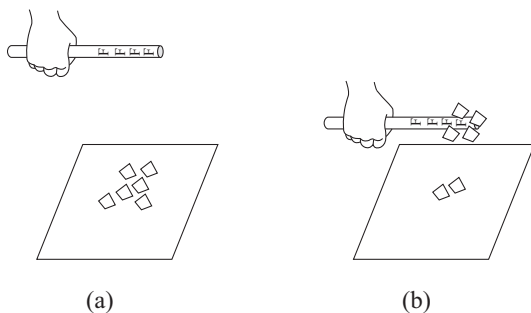


FIG. 2.3 : (a) Une paille frottée loin de petits morceaux de papier. (b) La paille frottée attire les morceaux de papier lorsqu'on l'approche vers eux.

d'entre eux touchent la paille et tombent. D'autres rebondissent sur la table. Ce phénomène sera abordé dans les sections 4.4 et 4.8.

Une expérience analogue peut être réalisée avec le corps en plastique d'un stylo, une règle en plastique ou un peigne en plastique. Afin d'éviter des phénomènes complexes ou des résultats inattendus, ces objets doivent être uniquement en plastique, sans parties métalliques, etc. Rien ne se passe lorsque nous approchons ces objets des petits morceaux de papier, à condition que ces corps n'aient pas été frottés au préalable. Nous frottons maintenant l'un de ces objets dans des cheveux ou avec une feuille de papier. Nous approchons ensuite le plastique frotté des morceaux de papier, sans les toucher. Ils sont à nouveau attirés par le plastique et restent collés à celui-ci. Chaque personne doit trouver un plastique approprié qui, lorsqu'il est frotté, attire facilement les petits morceaux de papier. Nous mentionnerons généralement les pailles, mais nous pouvons également utiliser des règles ou des peignes, en fonction de ce qui est disponible ou de ce qui produit un effet plus important.

Définitions : On dit généralement que le plastique qui n'a pas été frotté et qui n'attire pas les petits morceaux de papier est « électriquement neutre » ou, plus simplement, « neutre ». Lorsqu'il a été frotté, on dit que le plastique a « acquis une charge électrique », qu'il est devenu « électrisé », « chargé électriquement » ou, plus simplement, « chargé ». Ce processus est appelé « génération de charge par frottement », « génération de charge par friction », « électrisation par frottement », « triboélectrisation », « électrisation par frottement » ou « électrisation par friction ». Cette attraction est parfois appelée « attraction électrique » ou « attraction électrostatique ».

Dans cette expérience et d'autres présentées dans ce livre, nous ferons référence à la friction entre un corps en plastique et des cheveux (ou entre le plastique et une feuille de papier, ou entre le plastique et un mouchoir en papier). Pour que les expériences réussissent, il est recommandé d'entourer le corps en plastique d'une deuxième feuille de papier et de le tenir fermement dans les mains. Nous déplaçons ensuite rapidement le corps et le papier dans des directions opposées tout en les pressant l'un contre l'autre. Il est généralement préférable d'effectuer ce mouvement dans une seule direction pour chaque corps, plutôt que de faire un mouvement de va-et-vient. Par exemple, nous pouvons déplacer le plastique vers notre corps et le papier loin de nous. Il est également utile de répéter cette procédure plusieurs fois avant de commencer toute expérience, car cela améliore les effets observables. De temps en temps, il est utile de remplacer les matériaux afin d'observer comment l'effet varie en fonction des différents matériaux. La pratique permettra de déterminer les meilleurs matériaux et procédures pour une expérience réussie.

2.2 L'effet de l'ambre

La plupart d'entre nous avons réalisé une expérience similaire à celle-ci lorsque nous étions enfants ou adolescents. Et c'est grâce à une expérience analogue à celle-ci que toute la science de l'électricité est née ! Depuis au moins Platon (vers 428–348 av. J.-C.), on sait que l'ambre frotté attire les objets légers placés à proximité. La plus ancienne mention de ce fait, parfois appelé « l'effet de l'ambre », apparaît dans son dialogue, *Timée* :¹

Revenons à la respiration, pour déterminer en vertu de quelles causes elle est telle qu'à présent elle est. Voici. Du moment qu'il n'est aucun vide où un corps en mouvement puisse pénétrer, et comme l'air que nous respirons sort de nous, la conséquence est immédiatement claire pour tout le monde : l'air expiré ne se perd pas dans le vide, mais expulse l'air qui se trouve dans son voisinage de la place qu'il occupait, et l'air repoussé chasse l'air avoisinant en un mouvement incessant ; et, en vertu, de cette nécessité, tout cet air se trouve chassé en cercle vers l'endroit d'où est sorti le souffle. Cet endroit, l'air extérieur l'occupe et le remplit en suivant le souffle ; et tout cela se produit simultanément, à la manière d'une roue qui tourne, parce qu'il n'y a aucun vide. [...] Autres exemples : le mouvement des cours d'eau en général, et encore la chute de la foudre, les étonnants phénomènes d'attraction que produisent l'ambre et la pierre d'Héraclée. L'attraction n'intervient jamais dans aucun de ces effets. Mais si on cherche comme il faut, il

¹[Pla11b, Sections 79a-80d, pp. 2037–2039].

apparaîtra qu'il n'existe aucun vide, que ces corps exercent les uns sur les autres une poussée circulaire et que tous, s'associant ou se dissociant, vont prendre chacun sa place en opérant une permutation, cependant que les effets étonnants sont les produits de ces modifications combinées les unes avec les autres.

Et naturellement aussi, la respiration, qui fut le point de départ de cette discussion...

Il ne mentionne pas qui a découvert ce fait, mais d'après sa description désinvolte, il semble que l'effet de l'ambre était connu de ses lecteurs. Il relie l'effet de l'ambre à celui de la pierre d'Héraclès, ou aimant naturel. Platon rejette l'idée qu'il existe une véritable attraction entre l'ambre frotté et les objets légers qui se trouvent à proximité. Tous ces phénomènes s'expliquent selon les mêmes principes que la respiration, à savoir l'inexistence du vide.

L'ambre est une résine dure, translucide, de couleur jaunâtre à brunâtre,² parfois utilisée en joaillerie. Depuis le XIX^e siècle, on sait qu'il s'agit de la résine fossile de pins probablement morts depuis plusieurs millions d'années.³ Certaines boutiques vendent de l'ambre contenant des insectes fossilisés, tels que des fourmis, des puces ou des araignées. La figure 2.4 montre deux morceaux d'ambre.

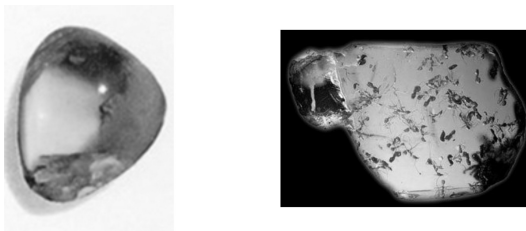


FIG. 2.4 : Morceaux d'ambre.

Aristote (384–322 av. J.-C.), dans ses *Météorologiques*, a présenté des preuves que l'ambre existait à l'origine sous forme liquide et s'était ensuite solidifié :⁴

Parmi les corps ayant pris consistance, ceux qui se sont solidifiés sous l'effet du froid viennent d'eau, par exemple la glace, la neige, la grêle et le givre; [...] Ceux dont l'humide s'est totalement évaporé, comme la poterie ou l'ambre (car l'ambre aussi et tous les corps qu'on appelle « larmes » résultent d'un refroidissement, ainsi la myrrhe, l'encens et la gomme; l'ambre aussi paraît relever de ce genre et peut se solidifier; on voit par exemple des animaux pris à l'intérieur de lui; sous l'effet du fleuve, le chaud s'échappe, comme il le fait du miel en train d'être bouilli lorsqu'on le verse dans de l'eau, et fait s'évaporer l'humide).

Selon certains auteurs modernes, l'expérience de l'ambre a été réalisée pour la première fois par Thalès de Milet, qui vécut entre 625 et 546 av. J.-C. Platon le cite

²Voir l'annexe A.

³[RR53].

⁴[Ari22c, Livre IV, chapitre 10, section 388b, pp. 960–961].

en premier dans sa liste des sept sages de la Grèce antique dans son dialogue *Protagoras*.⁵ Mais il ne lui attribue pas l'effet de l'ambre. Thalès est considéré par Aristote et plusieurs auteurs anciens comme le premier philosophe naturaliste, ou comme le premier physicien. Dans son ouvrage *Métaphysique*, Aristote écrit à son sujet (c'est nous qui soulignons en italique) :⁶

La plupart des premiers philosophes pensèrent que seuls les principes d'espèce matérielle sont les principes de tout. Ce à partir de quoi en effet tous les êtres existent, à partir de quoi ils naissent en premier et en quoi finalement ils sont détruits, c'est-à-dire la substance qui demeure alors que changent ses affections, ils déclarent que c'est l'élément et le principe des êtres, et c'est pourquoi ils pensent que rien ne naît ni ne périt, dans la pensée que cette nature est toujours sauvegardée. De même que nous ne déclarons ni que Socrate naît simplement chaque fois qu'il devient beau ou musicien, ni qu'il meurt chaque fois qu'il perd ces manières d'être parce que le substrat demeure, c'est-à-dire Socrate lui-même, cela n'est vrai d'aucune autre chose non plus, car il faut une certaine nature, une ou plusieurs, d'où naissent les autres choses parce que cette nature-là est sauvegardée.

Cependant ils ne s'accordent pas tous sur le nombre et la forme d'un tel principe. *Thalès, le fondateur de cette sorte de philosophie*, affirme que c'est l'eau ; c'est pourquoi aussi il a déclaré que la terre flotte sur l'eau, conception qu'il tirait peut-être de la constatation que la nourriture de toutes choses est humide, que le chaud même en naît et en vit (or ce à partir de quoi il y a génération est le principe de tout), tirant donc cette conception de là et du fait que les semences de toutes choses ont une nature humide et que l'eau est, pour les choses humides, le principe de leur nature.

Cependant, aucune des œuvres de Thalès ne nous est parvenue. L'origine de toutes les affirmations modernes reliant Thalès à l'expérience de l'ambre se trouve dans les écrits de Diogène Laërce, qui vécut vers le III^e siècle après J.-C. et fut biographe des philosophes grecs. Son œuvre la plus importante s'intitule *Vies et doctrines des philosophes illustres* et compte 10 volumes. Il dit ce qui suit à propos de Thalès :⁷

Le premier aussi il appela le dernier jour du mois le « trentième ». Il fut, selon certains, le premier à avoir disserté sur la nature.

Mais Aristote et Hippias disent qu'il attribuait des âmes même aux êtres inanimés, prenant comme indice la pierre magnétique et l'ambre.

Normalement, on attribue une âme à quelque chose qui est vivant ou qui peut bouger de son propre chef. Parfois, on attribue également une âme à quelque chose qui peut grandir, comme un homme, une plante ou un animal. Ce sont les corps vivants ou animés. Les corps inanimés, ou corps sans âme, sont ceux qui ne sont pas dotés de vie. Bien que les aimants et l'ambre ne grandissent ni ne bougent d'eux-mêmes, ils ont la propriété de générer le mouvement des objets à proximité (comme un aimant qui attire le fer ou est attiré par le fer, ou un morceau d'ambre frotté qui attire la balle

⁵[[Pla11a](#), Section 343a, p. 1464].

⁶[[Ari22b](#), Livre A, section 983b, p. 1742].

⁷[[Lae](#), p. 44].

de céréale⁸). Thalès a peut-être attribué une âme à un aimant ou à l'ambre en raison de ces propriétés.

Malgré ces déclarations de Diogène Laërce, il est douteux que Thalès ait vraiment été le premier à réaliser l'expérience de l'ambre.⁹ Il est considéré par les auteurs postérieurs comme l'initiateur de nombreuses découvertes en physique et en mathématiques, ce qui jette un doute sur la réalité de toutes ces réalisations. En ce qui concerne l'affirmation ci-dessus, il est difficile de vérifier les sources de Laërce. Les écrits d'Hippias ont été perdus. Quant à Aristote, nous ne trouvons dans ses œuvres existantes aucune mention de l'attribution de l'effet de l'ambre à Thalès. Dans son ouvrage *De l'âme*, Aristote mentionne que Thalès n'attribuait une âme qu'à l'aimant, car celui-ci peut déplacer le fer, mais il ne mentionne pas explicitement l'effet de l'ambre :¹⁰

Il semble, par ailleurs, d'après les souvenirs qu'on rapporte à son sujet, que Thalès, lui aussi, ait pensé que l'âme constitue une certaine réalité motrice, puisqu'il a déclaré que la pierre possède une âme en s'appuyant sur le fait qu'elle met le fer en mouvement.

Des fouilles archéologiques ont montré que l'ambre était connu plusieurs siècles avant Platon et même Thalès.¹¹ Il était utilisé dans la fabrication de bijoux et d'ornements. Il est très probable que de nombreuses personnes qui travaillaient l'ambre, le commercialisaient ou le manipulaient simplement aient observé ses propriétés attrayantes, probablement plusieurs siècles avant Thalès, bien qu'il n'existe aucun document écrit étayant cette hypothèse.

Quoi qu'il en soit, on sait avec certitude qu'au moins depuis l'époque de Platon, au IV^e siècle avant J.-C., l'effet de l'ambre était connu dans la Grèce antique. Dans l'Antiquité, l'ambre était probablement frotté avec des cheveux, des tissus ou la peau d'une personne ou d'un animal. On observait alors qu'il attirait les corps légers tels que les plumes de duvet, la balle de céréale ou les cheveux humains.

2.3 Explorer l'attraction exercée par des corps frottés

Afin d'obtenir un bon niveau de neutralité électrique pour les prochaines expériences, il est préférable d'utiliser au moins deux pailles ou deux règles en plastique. L'une d'elles ne sera jamais frottée. Ce sera notre paille neutre. L'autre paille sera celle qui sera frottée une ou plusieurs fois pendant les expériences. Même si cette deuxième paille semble avoir perdu sa charge électrique entre deux expériences, elle ne doit pas être utilisée comme paille neutre, car il se peut qu'il y reste une charge électrique résiduelle. Parfois, le simple fait de manipuler une paille ou d'enlever la poussière qui s'est accumulée à sa surface peut la charger. C'est pourquoi, pour qu'une paille soit considérée comme neutre, elle ne doit pas attirer les objets légers qui se trouvent à proximité.

⁸Voir l'annexe A.

⁹[The56, pp. 117–118] et [RR53].

¹⁰[Ari22a, Livre I, chapitre 2, section 405a, p. 974].

¹¹[Gui05, p. 59].

Expérience 2.2

Nous répétons maintenant l'expérience 2.1 en frottant la paille en plastique contre d'autres matériaux tels qu'une feuille de papier, la peau, un tissu ou un sac en plastique. En approchant la paille frottée de petits morceaux de papier ou de balle de céréale, nous pouvons voir qu'ils sont attirés par la paille comme dans l'expérience 2.1, lorsqu'elle était frottée avec des cheveux, mais pas toujours avec la même intensité. Une paille en plastique devient fortement électrisée lorsqu'elle est frottée avec des cheveux, du papier ou un mouchoir en coton. Elle ne devient pas toujours aussi fortement électrisée lorsqu'elle est frottée avec un sac en plastique.

2.4 Quels corps sont attirés par le plastique frotté ?

Expérience 2.3

Dans cette section, nous souhaitons répondre à la question suivante : « quels corps sont attirés par le plastique frotté ? » Des questions telles que celle-ci, ou « y a-t-il répulsion ? », « y a-t-il action et réaction ? », « combien de types de charges observe-t-on dans la nature ? », etc. sont bien sûr basées sur les connaissances actuelles. Normalement, les premiers chercheurs ne posaient pas ces questions, ou du moins pas sous cette forme. Ces questions sont davantage le résultat de leurs travaux que leur motivation. Quoi qu'il en soit, nous posons ces questions dans cet ouvrage afin d'attirer l'attention sur les principales propriétés des actions électriques.

Nous allons maintenant analyser quelles substances sont attirées par un plastique frotté ou par un morceau d'ambre frotté. Le frottement peut être effectué avec du papier, des cheveux ou un chiffon en coton. Pour ce faire, nous plaçons plusieurs groupes de substances légères sur différentes parties d'une table. Les substances peuvent avoir été divisées en petits morceaux, en fils courts ou pulvérisées. Il peut s'agir, par exemple, de balle de céréale, de fils de coton fins, de petits morceaux de sacs en plastique, de petits morceaux de feuille d'aluminium (comme ceux utilisés dans la cuisine ou les paquets de cigarettes), de poudre de craie, de farine, de limaille de fer, de laine d'acier, de petites boules de polystyrène, de duvet, de cheveux, de sciure, de sucre, de sel, de petits morceaux de liège, etc.

Nous tenons à souligner un point important avant de réaliser ces expériences. L'objet frotté ne doit pas toucher les substances sur la table ; il doit seulement être approché de celles-ci. Si l'objet frotté les touche, elles peuvent y adhérer en raison de l'humidité ou d'autres matières collantes à la surface de l'objet frotté ou à la surface de ces substances, et non en raison d'une attraction électrostatique entre elles.

Lorsque nous approchons un plastique neutre de ces substances, rien ne se passe. Après avoir frotté le plastique (ou l'ambre) et l'avoir approché de ces substances sans les toucher, on observe généralement que presque toutes sont attirées par le plastique frotté. Autrement dit, elles se déplacent vers le plastique frotté et sautent dessus. Seuls les petits morceaux de plastique ne sont pas attirés, ou le sont très peu par rapport à l'attraction observée avec les autres substances.

Expérience 2.4

Une expérience similaire peut être réalisée avec des fils ou des fils métalliques de plusieurs substances : soie, coton, polyester,¹² nylon (polyamide synthétique), cheveux et cuivre. Des bobines de fils de soie, de coton, de polyester et de polyamide à bas prix sont disponibles dans les magasins de couture. Le fil de soie, en particulier, sera utilisé dans de nombreuses expériences, il est donc judicieux d'en acheter une bobine. Quant au cuivre, il est possible de dérouler des fils toronnés vendus dans les magasins d'électricité. Un fil toronné contient plusieurs fils de cuivre fins juxtaposés. Dans cette expérience, nous n'utilisons qu'un seul de ces fils de cuivre fins, coupé en petits morceaux que nous appellerons également fils.

Nous coupons plusieurs morceaux de ces fils de la même longueur, par exemple 1 ou 2 cm. À un endroit de la table, nous plaçons des morceaux de soie, à un autre, des morceaux de polyester, et ainsi de suite. Nous approchons un plastique neutre de ces substances et rien ne se passe. Nous frottons une autre paille et l'approchons de chacun de ces groupes de fils, sans les toucher. Nous observons que les fils de coton et de cuivre sont fortement attirés. Les autres substances ne sont pas attirées ou le sont beaucoup moins que les fils de coton ou de cuivre.

Dans ce cas, nous avons des fils de même longueur mais de poids différents, en raison des densités et des épaisseurs différentes de ces fils. Cependant, il est facile de voir que le coton et le cuivre sont les fils les plus lourds en raison de leur densité plus élevée et parfois aussi de leur plus grande épaisseur. Malgré cela, ils sont plus attirés par le plastique frotté que les substances plus légères.

Pour les substances qui ont approximativement le même poids, nous observons à partir de ces expériences que la majorité d'entre elles sont attirées par le plastique frotté, bien que certaines le soient beaucoup plus que d'autres. Seules quelques-unes d'entre elles ne semblent pas être attirées ou montrent une attraction très faible.

Expérience 2.5

Une expérience intéressante pour montrer l'attraction exercée par le plastique frotté sur les métaux utilise des canettes vides de bière ou de boisson gazeuse en aluminium. L'une de ces canettes est posée sur une surface lisse. Une paille en plastique est frottée et approchée de cette canette, la longueur de la paille étant maintenue parallèle à la canette, à la même hauteur que l'axe de symétrie de la canette. Lorsque la paille est très proche de la canette, sans la toucher, celle-ci commence à se déplacer vers la paille, figure 2.5. On peut même faire avancer et reculer la canette en changeant la position de la paille frottée, devant ou derrière la canette.

Expérience 2.6

Nous approchons un aimant naturel, tel qu'un aimant de réfrigérateur ou un aimant de haut-parleur, des substances décrites dans les expériences 2.3 et 2.4. Nous observons que l'aimant n'attire que la limaille de fer et la laine d'acier. L'aimant n'a

¹²Voir l'annexe A.

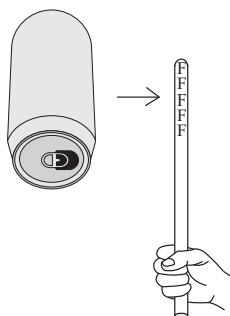


FIG. 2.5 : Une paille frottée attire une boîte métallique.

aucun effet sur les autres substances, même pas sur les morceaux de fil de cuivre ou de feuille d'aluminium.

C'est l'une des principales différences entre les forces électrique et magnétique. L'ambre frotté et le plastique frotté attirent presque toutes les substances légères. Un aimant permanent, en revanche, n'attire que quelques substances : en général, uniquement celles qui contiennent du fer.

Les mots aimant, magnétisme, magnétique, etc. tirent leur nom d'une région appelée Magnésie, où les Grecs de l'Antiquité ont trouvé le minéral magnétique naturel, un oxyde de fer qui avait la propriété d'attirer de petits morceaux de fer.

Expérience 2.7

Nous essayons de coller un aimant à une casserole en aluminium, sans succès. Nous ne parvenons pas non plus à attirer avec l'aimant la canette en aluminium de l'expérience 2.5. Cela montre une fois de plus la distinction entre les forces électrique et magnétique. Cela confirme également que tous les métaux ne sont pas attirés par un aimant, mais seulement quelques types de métaux, généralement ceux qui contiennent du fer dans leur composition.

2.5 Est-il possible d'attirer des liquides ?

Expérience 2.8

Dans l'expérience 2.1, nous avons travaillé avec des substances solides. Nous allons maintenant examiner l'effet du plastique frotté sur des liquides. Une fois encore, il est préférable de rapprocher la paille du liquide. La paille peut être neutre ou avoir été frottée au préalable. Il faut toujours éviter que la paille touche le liquide.

Nous ouvrons le robinet de manière à obtenir un mince filet d'eau qui coule régulièrement, figure 2.6 (a). Nous approchons une paille en plastique neutre du filet et rien ne se passe.

Nous frottons une autre paille et la rapprochons du filet d'eau. Cette fois, le filet se courbe vers la paille frottée, figure 2.6 (b). Ce phénomène est plus facile à observer en

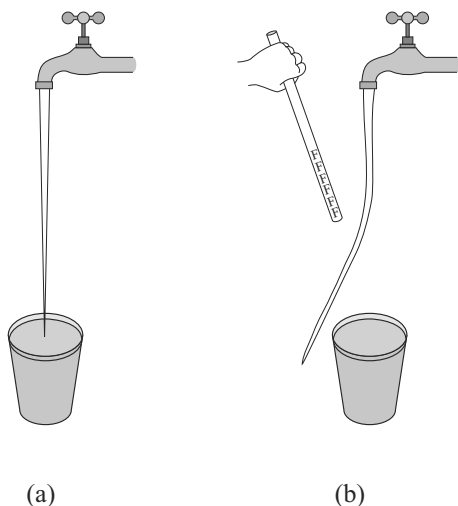


FIG. 2.6 : Une paille frottée attirant un filet d'eau.

déplaçant la paille frottée près 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. Une fois de plus, l'effet est plus visible lorsque la paille frottée est proche des gouttes les plus lentes.

Expérience 2.9

Un phénomène analogue se produit lorsque l'on approche un morceau de plastique frotté d'un filet de lait, de détergent, d'alcool, de kérosène, de shampoing ou d'huile végétale de cuisine. En effet, tous ces filets sont attirés par le plastique frotté, mais ne sont pas attirés par une paille qui n'a pas été frottée au préalable. 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.

Une expérience analogue à celles-ci semble avoir été réalisée pour la première fois par Jean Théophile Desaguliers (1683–1744) en 1741.¹³ À la fin de son article, Desaguliers a déclaré ce qui suit :¹⁴

Après avoir correctement suspendu (c'est-à-dire suspendu à l'aide d'un corps électrique, ici du boyau de chat)¹⁵ une fontaine en cuivre avec le bec verseur vers

¹³[Des41b, pp. 666–667] et [Pri66, p. 85].

¹⁴Having properly suspended (that is, suspended by some electric body, here Cat-gut) a copper Fountain with the Spout downwards, I opened the Cock, and let the Water spout into a Vessel underneath : Then, having excited [by friction] a great [glass] Tube to Electricity, I held it over the copper Fountain, whilst an Assistant held the Thread of Trial (that is, a Thread hanging from a Stick) near several Parts of the Jet, which attracted it sensibly : Then I applied the rubbed Tube near to the falling Jet, which attracted it strongly, so as to bend it into a Curve, and sometimes cause it to fall out of the Vessel below.

¹⁵Voir l'annexe A.

le bas, j'ai ouvert le robinet et laissé l'eau s'écouler dans un récipient placé en dessous. Ensuite, après avoir excité [par friction] un grand tube [de verre], je l'ai tenu au-dessus de la fontaine en cuivre, tandis qu'un assistant tenait le fil d'essai (c'est-à-dire un fil suspendu à un bâton) près de plusieurs parties du filet d'eau, qui l'attirait sensiblement. J'ai ensuite appliqué le tube frotté près du filet tombant, qui l'attirait fortement, au point de le courber et parfois de le faire tomber du récipient situé en dessous.

Les élèves apprécient cette expérience amusante et intéressante. Elle sera abordée plus en détail dans la section 7.11.

Expérience 2.10

Une expérience similaire peut être réalisée avec de petites flaques d'eau placées sur une surface sèche. Lorsque nous approchons une paille neutre de la goutte d'eau, rien ne se passe. En revanche, lorsque nous approchons un plastique frotté de l'eau, nous observons que la surface de l'eau se déforme, les parties les plus proches de la paille ayant tendance à se rapprocher du plastique, figure 2.7. Parfois, la goutte d'eau s'écoule même sur la surface sèche, se déplaçant dans son ensemble vers le plastique frotté. Le même phénomène se produit avec les autres liquides mentionnés précédemment, à des degrés divers.

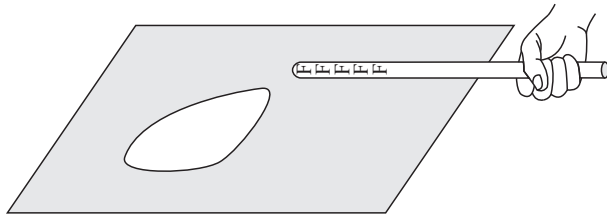


FIG. 2.7 : Une paille frottée attirant une goutte d'eau.

2.6 Gilbert et certaines de ses expériences électriques

L'un des scientifiques à l'origine des recherches modernes sur le magnétisme et l'électricité était William Gilbert (1544–1603), figure 2.8, un médecin anglais.¹⁶

En 1600, il publia un ouvrage très important dans l'histoire des sciences, *De Magnete (Sur l'aimant)*. Dans notre texte, nous travaillerons à partir de la traduction en langue anglaise de P. F. Mottelay : *On the Loadstone and Magnetic Bodies and on the Great Magnet the Earth*.¹⁷ Dans cet ouvrage, il décrivait de nombreuses découvertes importantes liées au magnétisme. À cette époque, l'orientation de l'aiguille magnétique s'expliquait par l'alignement des pôles magnétiques de l'aiguille avec les pôles

¹⁶[Kel81].

¹⁷[Gil78].



FIG. 2.8 : William Gilbert (1544–1603).

de la sphère céleste. Gilbert, quant à lui, a présenté l'idée que la Terre est un énorme aimant et qu'elle possède donc des propriétés magnétiques. Il a ensuite expliqué l'orientation de l'aiguille magnétique par son alignement avec les pôles magnétiques de la Terre. Dans le deuxième chapitre de son ouvrage, Gilbert décrit plusieurs expériences électrostatiques réalisées afin de distinguer les phénomènes associés aux aimants de ceux associés à l'ambre :^{18,19}

Il convient de dire quelques mots sur cette substance [l'ambre] afin de montrer la nature des attractions des corps pour celle-ci et de souligner la grande différence entre celles-ci et les actions magnétiques; car les hommes continuent d'ignorer et considèrent que l'inclination des corps pour l'ambre est une attraction comparable à la copulation magnétique.

Il appelait « électriques » les corps qui avaient la même propriété que l'ambre, notre accentuation en italique :^{20,21}

Les Grecs appellent cette substance ἤλεκτρον [électron ou ambre], car, lorsqu'elle est chauffée par frottement, elle attire à elle la balle de céréale; [...] Ces différents corps (*électriques*) attirent non seulement la paille et la balle, mais aussi tous les

¹⁸[Gil78, p. 27].

¹⁹Of this substance [the amber] a few words must be said, to show the nature of the attachments of bodies to it, and to point out the vast difference between this and the magnetic actions; for men still continue in ignorance, and deem that inclination of bodies to amber to be an attraction, and comparable to the magnetic coition.

²⁰[Gil78, p. 27].

²¹The Greeks call this substance ἤλεκτρον [electron or amber], because, when heated by rubbing, it attracts to itself chaff; [...] These several bodies (*electrics*) not only draw to themselves straws and chaff, but all metals, wood, leaves, stones, earths, even water and oil; in short, whatever things appeal to our senses or are solid : yet we are told [by several ancient authors] that it attracts nothing but chaff and twigs.

métaux, le bois, les feuilles, les pierres, la terre, voire l'eau et l'huile ; en bref, tout ce qui attire nos sens ou qui est solide : pourtant, plusieurs auteurs anciens nous disent qu'elle n'attire rien d'autre que la balle de céréale et les brindilles.

Ou bien :^{22,23}

Et la ressemblance n'est pas la cause de l'attraction de l'ambre, car toutes les choses que nous voyons sur le globe, qu'elles soient similaires ou dissemblables, sont attirées par l'ambre et autres substances similaires ; par conséquent, aucune analogie forte ne peut être établie à partir de la ressemblance ou de l'identité de la substance.

Ou encore :^{24,25}

Une pierre magnétique n'attire que les corps magnétiques ; les corps électriques attirent tout.

Gilbert semble avoir été le premier à observer qu'un liquide était attiré par de l'ambre frotté, en réalisant une expérience analogue à celle représentée dans la figure 2.7 :^{26,27}

Il [l'ambre frotté] attire clairement le corps lui-même dans le cas d'une goutte d'eau sphérique posée sur une surface sèche ; en effet, un morceau d'ambre tenu à une distance appropriée attire vers lui les particules les plus proches et les rassemble en un cône ; si elles étaient attirées par l'air, la goutte entière se dirigerait vers l'ambre.

Les seules exceptions à l'attraction de l'ambre frotté mentionnées par Gilbert étaient les objets enflammés ou extrêmement raréfiés,^{28,29}

[...] car tous les corps sont attirés par tous les éléments électriques, sauf les corps enflammés ou trop raréfiés, comme l'air qui est l'effluve universel du globe.

Il a prouvé que l'ambre frotté n'attire pas l'air de la manière suivante :^{30,31}

²² [Gil78, p. 28].

²³ And likeness is not the cause of amber's attracting, for all things that we see on the globe, whether similar or dissimilar, are attracted by amber and such like ; hence no strong analogy is to be drawn either from likeness or from identity of substance.

²⁴ [Gil78, p. 30].

²⁵ A loadstone attracts only magnetic bodies ; electrics attract everything.

²⁶ [Gil78, p. 31].

²⁷ It [rubbed amber] plainly attracts the body itself in the case of a spherical drop of water standing on a dry surface ; for a piece of amber held at suitable distance pulls toward itself the nearest particles and draws them up into a cone ; were they drawn by the air the whole drop would come toward the amber.

²⁸ [Gil78, p. 29].

²⁹ [...] for all bodies are drawn to all electrics, save bodies aflame or too rarefied, as the air which is the universal effluve of the globe.

³⁰ [Gil78, p. 31].

³¹ And that amber does not attract the air is thus proved : take a very slender wax candle giving a very small clear flame ; bring a broad flat piece of amber or jet, carefully prepared and rubbed thoroughly, within a couple of fingers' distance from it ; now an amber that will attract bodies from a considerable radius will cause no motion in the flame, though such motion would be inevitable if the air were moving, for the flame would follow the current of air.

Et le fait que l'ambre n'attire pas l'air est ainsi prouvé : prenez une bougie de cire très fine produisant une petite flamme claire ; approchez-en un large morceau d'ambre ou de jais,³² soigneusement préparé et frotté, à une distance de deux doigts ; maintenant, un ambre qui attire les corps dans un rayon considérable ne provoquera aucun mouvement dans la flamme, alors qu'un tel mouvement serait inévitable si l'air était en mouvement, car la flamme suivrait le courant d'air.

Plus loin, il écrit :^{33,34}

Les électriques attirent toutes choses sauf les flammes et les objets enflammés, ainsi que l'air le plus rare. Et comme ils n'attirent pas les flammes, ils n'ont aucun effet sur un versorium³⁵ si celui-ci est très proche, de n'importe quel côté, de la flamme d'une lampe ou de toute autre substance brûlante ; car il est évident que les effluves sont consumés par la flamme et la chaleur ignée. Par conséquent, les électriques n'attirent ni les flammes ni les corps proches des flammes ; car ces effluves ont la vertu et l'analogie d'une humeur raréfiée, et ils produiront leur effet, provoquant l'union et la continuité, non pas par l'action externe des humeurs, ni par la chaleur, ni par l'atténuation des corps chauffés, mais par l'atténuation de la substance humide en ses propres effluves spécifiques. Pourtant, ils attirent vers eux la fumée d'une bougie éteinte ; et plus la fumée s'allège en montant, moins elle est fortement attirée, car les substances trop raréfiées ne subissent pas d'attraction.

D'après ce que l'on a pu observer jusqu'à présent, toutes les substances ne sont pas affectées par l'ambre frotté (ou, du moins, toutes les substances ne sont pas attirées avec la même force). Même certaines substances ayant le même poids et la même forme sont clairement plus fortement attirées par un plastique frotté que d'autres. Par exemple, des fils de coton ou de cuivre de même taille ressentent une attraction plus forte que des fils de soie ou de polyamide synthétique.

2.7 Quelles substances frottées attirent les corps légers ?

Expérience 2.11

Nous allons maintenant essayer d'attirer les petits morceaux de papier placés sur une table. Nous approchons plusieurs objets frottés près des morceaux de papier. Nous

³²Voir l'annexe A.

³³[Gil78, pp. 33–34].

³⁴Electrics attract all things save flame and objects aflame, and thinnest air. And as they do not draw to themselves flame, so they have no effect on a versorium if it have very near it on any side the flame of a lamp or of any burning substance ; for it is plain that the effluvia are consumed by flame and igneous heat. Therefore electrics do not attract either flame or bodies near flame ; for such effluvia have the virtue and analogy of rarefied humour, and they will produce their effect, bringing about union and continuity, not through the external action of humours, or through heat, or through attenuation of heated bodies, but through the attenuation of the humid substance into its own specific effluvia. Yet they draw to themselves the smoke from an extinguished candle ; and the lighter the smoke becomes as it ascends, the less strongly is it attracted, for substances that are too rare do not suffer attraction.

³⁵Voir le chapitre 3.

allons frotter ces objets dans des cheveux, avec une feuille de papier ou avec un mouchoir en coton. Il est important d'avoir des objets homogènes, c'est-à-dire des objets faits d'un seul matériau, afin d'éviter des résultats contradictoires. Il ne faut pas, par exemple, frotter un stylo en plastique avec des pièces métalliques. Dans ce cas, il est préférable de frotter séparément une paille en plastique et une cuillère en métal.

Nous énumérons ici certaines de ces substances : plastique, ambre, verre, bois, métal, acrylique, aimant naturel, carton fin, caoutchouc, etc.

Lorsque les précautions mentionnées précédemment ont été prises, on observe généralement qu'après frottement, l'ambre, l'acrylique et les objets en plastique attirent les petits morceaux de papier, comme dans l'expérience 2.1, figure 2.3.

Toutes les autres substances n'attirent généralement pas les morceaux de papier, quelle que soit la durée ou la force du frottement. Ceci est représenté dans la figure 2.9 pour une brochette en bois.

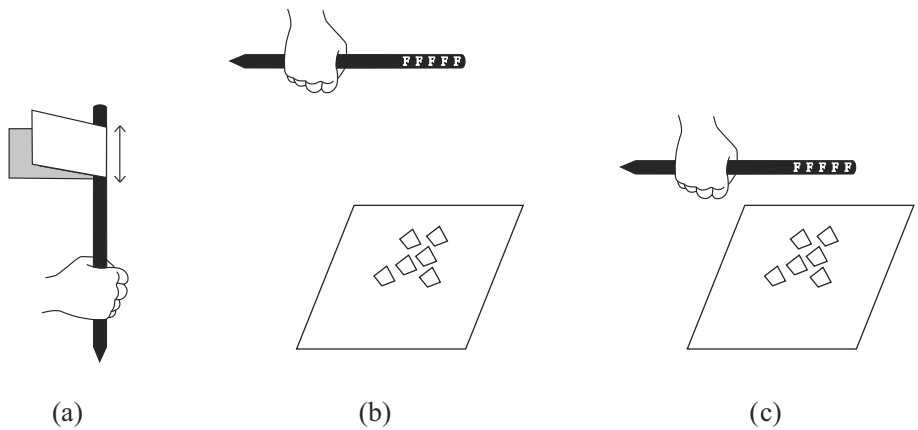


FIG. 2.9 : (a) Une brochette en bois frottée avec un mouchoir en coton ou des cheveux. (b) La brochette frottée loin des morceaux de papier. (c) Nous observons qu'elle n'attire pas les petits morceaux de papier lorsqu'on l'approche de ceux-ci.

Dans le cas du verre, il existe des exceptions, car il existe plusieurs variétés de verre dont la composition varie et qui sont fabriquées selon différents procédés. Mais en général, après avoir été frottés, les verres les plus courants n'attirent pas les morceaux de papier. Il en va de même pour le caoutchouc, car il en existe plusieurs variétés. Les types de caoutchouc que l'on trouve habituellement à la maison n'attirent pas les morceaux de papier.

2.8 La nomenclature de Gilbert : les corps électriques et non électriques

Jusqu'à l'époque de Gilbert, seules quelques substances étaient connues pour attirer de petits objets après avoir été frottées. Il s'agissait notamment de l'ambre, du

jais,³⁶ et du diamant. C'est au Moyen Âge que l'on découvrit que le jais, une forme compacte et dure de charbon, attirait également les objets comme l'ambre.³⁷ L'aimant naturel attirait le fer et ses composés. Mais il n'attirait pas la paille ou la balle de céréale après avoir été frotté. Les autres substances n'attiraient pas non plus les objets légers après avoir été frottées. L'une des principales contributions de Gilbert à la science de l'électricité fut la découverte de nombreuses nouvelles substances qui se comportaient comme l'ambre après avoir été frottées :^{38,39}

Les anciens comme les modernes affirment (et leur rapport se limite à leur expérience) que l'ambre attire la paille et la balle de céréale. Il en va de même pour le jais, une pierre extraite du sol en Grande-Bretagne, en Allemagne et dans de nombreuses autres régions : il s'agit d'une concrétion dure de bitume noir, une sorte de transformation du bitume en pierre. [...] Car non seulement l'ambre et le jais (ou gagates) attirent, comme ils le supposent, les corpuscules légers (substances), mais il en va de même pour le diamant, le saphir, l'escarboucle, l'iris, l'opale, l'améthyste, la vinentine, la gemme anglaise (pierre de Bristol, *bristola*), le béryl et le cristal de roche. Le verre, en particulier le verre clair et brillant, possède des pouvoirs d'attraction similaires, tout comme les gemmes artificielles faites de verre (pâte) ou de cristal de roche, le verre à l'antimoine, de nombreux fluorures et les bélemnites. Le soufre attire également, tout comme le mastic, la cire à cacheter [ou laque], la résine dure et l'orpiment (faiblement). Le sal gemma [chlorure de sodium natif], le mica et l'alun de roche possèdent également un faible pouvoir d'attraction qui favorise l'atmosphère sèche.

Les substances frottées qui n'attiraient pas les corps légers étaient dites « non électriques ». Parmi ces substances, Gilbert citait les métaux, plusieurs types de bois, l'aimant naturel, différentes pierres précieuses, etc. Nous citons son ouvrage :^{40,41}

À l'air libre, les objets chauffés ne peuvent pas attirer, pas même les métaux ou les pierres portés à très haute température par le feu. Une tige de fer chauffée au rouge, une flamme, une bougie, une torche enflammée ou un charbon ardent, lorsqu'ils sont approchés de pailles ou d'un pointeur rotatif (*versorium*), n'attirent pas ; et pourtant, il est évident que tous ces objets provoquent un courant d'air vers eux, car ils consomment de l'air comme une lampe consomme de l'huile.

³⁶Voir l'annexe A.

³⁷[RR57, p. 546].

³⁸[Gil78, p. 27, mots de Mottelay entre crochets].

³⁹The ancients as well as moderns tell (and their report is confined by experience) that amber attracts straw and chaff. The same is done by jet, a stone taken out of the earth in Britain, Germany, and many other regions : it is a hard concretion of black bitumen,—a sort of transformation of bitumen to stone. [...] For not only do amber and (gagates or) jet, as they suppose, attract light corpuscles (substances) : the same is done by diamond, sapphire, carbuncle, iris stone, opal, amethyst, vinentina, English gem (Bristol stone, *bristola*), beryl, rock crystal. Like powers of attracting are possessed by glass, especially clear, brilliant glass ; by artificial gems made of (paste) glass or rock crystal, antimony glass, many fluor-spars, and belemnites. Sulphur also attracts, and likewise mastic, and sealing-wax [or lac], hard resin, orpiment (weakly). Feeble power of attraction is also possessed in favoring dry atmosphere by sal gemma [native chloride of sodium], mica, rock alum.

⁴⁰[Gil78, p. 28].

⁴¹In open air, heated objects cannot attract, not even metals or stones brought to a very high temperature by fire. For an iron rod at white heat, a flame, a candle, a flaming torch, or a red-hot coal when brought near to straws or to a revolving pointer (*versorium*) does not attract ; and yet plainly all these cause the air to come to them in a current, for they consume air as a lamp consumes oil.

La liste suivante est très importante :^{42,43}

Mais de très nombreux corps électriques (comme les pierres précieuses, etc.) n'attirent pas du tout à moins d'être d'abord frottés; tandis que divers autres corps, parmi lesquels certaines gemmes, n'ont aucun pouvoir d'attraction et ne peuvent être rendus attractifs, même par friction; ces corps sont l'émeraude, l'agate, la cornaline, les perles, le jaspe, la calcédoine, l'albâtre, le porphyre, le corail, les marbres, le lapis lydius (pierre de touche, basanite), le silex, la pierre de sang, l'émeri ou le corindon (*mugris*), l'os, l'ivoire; les bois les plus durs, comme l'ébène; certains autres bois, comme le cèdre, le genévrier, le cyprès; les métaux, comme l'argent, l'or, le cuivre, le fer. La pierre magnétique, bien qu'elle puisse être polie à un très haut degré, n'a pas d'attraction électrique.

De même :^{44,45}

C'est pour cette raison que ni les métaux, ni les marbres, ni les silex, ni les bois, ni les herbes, ni la chair, ni diverses autres substances ne peuvent attirer ou solliciter un corps, que ce soit magnétiquement ou électriquement (car nous aimons appeler force électrique cette force qui trouve son origine dans les humeurs). Mais les corps composés principalement d'humeurs et qui ne sont pas solidement compactés par nature, et qui ne résistent donc pas à la friction, mais se désagrègent, se ramollissent ou deviennent collants, comme le poix, la colophane molle, le camphre, le galbanum, l'ammoniac, le storax, l'asa, la gomme benjamin, l'asphalte (en particulier dans une atmosphère chaude), n'attirent pas les corpuscules. En effet, sans friction, peu de corps dégagent leurs véritables *émation* et effluve électriques naturels. La résine de térébenthine à l'état liquide n'attire pas, car elle ne peut être frottée; mais lorsqu'elle durcit pour former un mastic, elle attire.

Plusieurs mots utilisés aujourd'hui trouvent leur origine dans le mot ambre (ou « électron » en grec) : électrique, électron, électricité, électret, électronique, électricien, électroaimant, électrode, etc. À l'origine, le mot « électricité » désignait la propriété ou le pouvoir d'attirer des corps légers, comme c'était le cas pour l'ambre frotté.⁴⁶ Ce mot est apparu pour la première fois dans un ouvrage imprimé de Sir Thomas Browne (1605–1682) en 1646. En 1820, Ørsted a introduit les termes « électromagnétisme » et

⁴² [Gil78, p. 29].

⁴³ But very many electric bodies (as precious stones, etc.) do not attract at all unless they are first rubbed; while sundry other bodies, and among them some gems, have no power of attraction, and cannot be made to attract, even by friction; such bodies are emerald, agate, carnelian, pearls, jasper, chalcedony, alabaster, porphyry, coral, the marbles, lapis lydius (touchstone, basanite), flint, bloodstone, emery or corundum (*mugris*), bone, ivory; the hardest woods, as ebony; some other woods, as cedar, juniper, cypress; metals, as silver, gold, copper, iron. The loadstone, though it is susceptible of a very high polish, has not the electric attraction.

⁴⁴ [Gil78, p. 30].

⁴⁵ For this reason it is that neither metals, marbles, flints, woods, grasses, flesh, nor various other substances can attract or solicit a body, whether magnetically or electrically (for it pleases us to call electric force that force which has its origin in humours). But bodies consisting mostly of humour and not firmly compacted by nature wherefore they do not stand friction, but either fall to pieces or grow soft, or are sticky, as pitch, soft rosin, camphor, galbanum, ammoniacum, storax, asa, gum benjamin, asphaltum (especially in a warm atmosphere), do not attract corpuscles. For without friction few bodies give their true natural electric *emanation* and effluviium. Turpentine resin in the liquid state does not attract, because it cannot be rubbed; but when it hardens to a mastic it does attract.

⁴⁶ [RR57, p. 558], [Hea67], et [Hei99, p. 169].

« électromagnétique », tandis qu'en 1822, Ampère a introduit les termes « électrostatique » et « électrodynamique ».⁴⁷

Gilbert appelait « électriques » tous les corps qui attiraient les substances légères après avoir été frottés, bien que cette nomenclature ne soit plus utilisée aujourd'hui. Les raisons de ce changement de nomenclature sont expliquées dans les chapitres 6 et 8 et l'annexe B. Afin de faciliter la compréhension de plusieurs citations historiques qui apparaîtront dans cet ouvrage, il est important de savoir que ces matériaux sont désormais classés comme « isolants » et « conducteurs ». Les isolants sont également appelés « non-conducteurs » ou « diélectriques ». Les substances que Gilbert classait comme électriques sont désormais appelées isolants. Et les substances qui étaient auparavant classées comme non électriques sont désormais appelées conducteurs.

⁴⁷[Amp22, p. 60], [Ørs98a, p. 421], [Ørs98b, p. 426], [Blo82, p. 78], [GG90, p. 920], [GG91, p. 116], et [Cha09, pp. 24–26].

Chapitre 3

Le versorium

3.1 Le perpendiculaire de Fracastoro et le versorium de Gilbert

Nous allons maintenant parler du plus ancien instrument électrique. Il a été créé par Girolamo Fracastoro, ou Jérôme Fracastor (1478–1553), figure 3.1. Certains l'appellent Fracastoro, d'autres Fracastorio.¹ Il était poète, médecin et philosophe à Vérone.² Fracastoro est surtout connu pour ses travaux sur la médecine, en particulier l'épidémiologie. Il a donné le nom de « syphilis » à une maladie vénérienne connue.



FIG. 3.1 : Girolamo Fracastoro (1478–1553).

Son instrument a été présenté pour la première fois dans un ouvrage publié

¹[Ben98, p. 241].

²[Zan81].

en 1546.³ Il l'utilisa pour montrer que l'ambre frotté attire non seulement la paille et la balle de céréale, mais aussi un autre morceau d'ambre, et même un métal comme l'argent. Il découvrit également que le diamant a la propriété d'attirer les substances légères après avoir été frotté, comme c'est le cas de l'ambre. Fracastoro décrit son nouvel instrument en ces termes :⁴

En effet, en présence de plusieurs de nos médecins, nous avons fait l'expérience de nombreuses choses avec un « perpendicule » bien adapté, comme dans une boussole de navigation, et nous avons clairement vu que l'aimant attire l'aimant, le fer [magnétisé attire] le fer, puisque l'aimant attire le fer et le fer attire l'aimant ; et encore, l'ambre [frotté] attire les petits morceaux d'ambre... et de même, l'ambre [frotté] n'attire pas seulement vers elle la paille et la balle de céréale, mais aussi l'argent.

Quand il écrit « perpendicule », Fracastoro fait peut-être référence à un fil à plomb,⁵ c'est-à-dire un petit objet suspendu à un support par un fil vertical, comme un pendule. Le fil peut bouger librement dans toutes les directions autour du point auquel il est attaché. Le mot « perpendicule » est lié à « perpendiculaire », qui signifie une ligne droite perpendiculaire à l'horizon. Un fil à plomb est utilisé pour indiquer une direction verticale. Il est donc naturel de supposer que le perpendicule de Fracastoro était analogue à un fil à plomb.

D'après la description ci-dessus, nous déduisons que Fracastoro fixait un petit morceau d'ambre ou d'argent à l'extrémité du fil. Lorsqu'il approchait un morceau d'ambre frotté du perpendicule, il observait que celui-ci s'écartait de la direction verticale pour se rapprocher de l'ambre frotté, figure 3.2. L'avantage du perpendicule par rapport à la paille ou à la balle de céréale est que la tension du fil contrebalance le poids du corps suspendu. Il est alors facile d'observer son mouvement dans le sens horizontal, même pour une force d'attraction faible. En revanche, si le petit morceau d'ambre ou d'argent avait été posé sur une table, il aurait été plus difficile d'observer ou de détecter tout mouvement dû à son poids. Autrement dit, il aurait été difficile de voir son mouvement vertical vers un morceau d'ambre frotté placé à proximité.

Gilbert connaissait l'ouvrage de Fracastoro et l'a cité à plusieurs reprises dans son livre :^{6,7}

³[Gli33] et [Hei99, p. 175].

⁴« Nos enim praesentibus multis è nostris medicis experientiam multorum fecimus, perpendiculo bene & concinne aptato, quale est in nauigatoria pyxide, ac manifeste vidimus magnetè trahere magnetè, ferrum ferrū, tum magnetem trahere ferrum, ferrum magnetem porrò electrum parua electri frustula rapere, argentum attrahere argentum, & quod valde inirati fuimus, magnetem vidimus argentum trahere : item Electrum non solum surculos & paleas mouere ad se, sed & argentum. » [Fra55, p. 85 verso]. En italien : « Noi infatti alla presenza di molti dei nostri medici facemmo esperienza di molte cose con un perpendiculo bene e convenientemente adattato come è nella bussola da navigare e vedemmo manifestamente che il magnete attrae il magnete, il ferro il ferro, poi che il magnete attrae il ferro e il ferro il magnete ; e ancora, l'ambra rapisce pezzettini d'ambra... e parimenti l'ambra non avvicina solamente a sè i fuscilli e le pagliuzze, ma anche l'argento. » [Gli33].

⁵[Sas02].

⁶[Gil78, pp. 28–29].

⁷Fracastoro thinks that all bodies that mutually attract are alike, or of the same species, and that, either in their action or in their proper *subjectum* : “Now the proper *subjectum*,” says he [Fracastoro], “is that from which is emitted that emanational something which attracts, and, in mixed substances, this is not

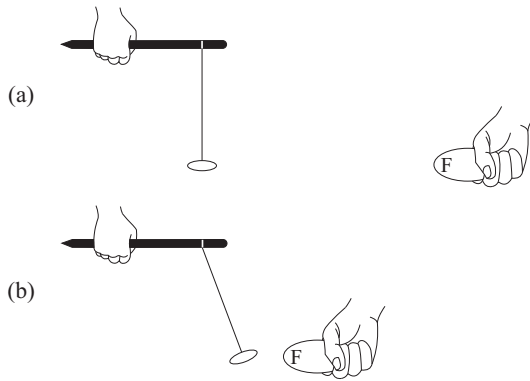


FIG. 3.2 : Représentation possible du perpendiculaire de Fracastoro et de l'expérience qu'il aurait pu réaliser avec cet instrument. (a) La main tient un gros morceau d'ambre. La partie frottée de cet ambre est représentée par la lettre *F*. À l'extrémité inférieure du perpendiculaire se trouve un autre petit morceau d'ambre ou d'argent qui n'a pas été frotté. Lorsque le gros morceau d'ambre est éloigné du perpendiculaire, le fil reste au repos à la verticale. (b) Le perpendiculaire est attiré lorsque l'ambre frotté *F* est approché du petit morceau d'ambre ou d'argent.

Fracastorio pense que tous les corps qui s'attirent mutuellement sont semblables, ou de la même espèce, et que, soit dans leur action, soit dans leur propre *subjectum* : « Or, le *subjectum* propre, dit-il [Fracastoro], est ce d'où émane cette chose émanationnelle qui attire, et, dans les substances mixtes, cela n'est pas perceptible en raison de la déformation, par laquelle elles sont une chose *actu*, une autre *potentia*. C'est peut-être pour cela que les cheveux et les brindilles sont attirés par l'ambre et le diamant, non pas parce qu'ils sont des cheveux, mais parce qu'ils renferment de l'air ou un autre principe qui est d'abord attiré et qui a un rapport et une analogie avec ce qui attire en soi ; et en cela, l'ambre et le diamant ne font qu'un, en vertu d'un principe commun aux deux. » Voilà pour Fracastorio.

Gilbert a probablement commencé à étudier les propriétés attractives d'autres pierres précieuses après avoir étudié ce livre de Fracastoro. Gilbert décrit également un instrument qu'il a appelé « versorium »,⁸ bien qu'il n'ait pas mentionné qu'un instrument similaire, le « perpendiculaire », avait été inventé par Fracastoro. L'image originale de Gilbert du versorium est présentée dans la figure 3.3.

Le nom « versorium » (pluriel « versoria ») vient d'un mot latin qui signifie « tourner » ou « tourner sur soi-même ». Le versorium est un instrument qui se compose généralement de deux parties : un élément vertical, qui sert de support, et un élément horizontal soutenu, capable de tourner librement autour de l'axe vertical défini par

perceptible on account of deformation, whereby they are one thing *actu*, another *potentia*. Hence, perhaps, hairs and twigs are drawn to amber and diamond not because they are hairs, but because there is imprisoned within them either air or some other principle that is first attracted and that has reference and analogy to that which of itself attracts; and herein amber and diamond are as one, in virtue of a principle common to both." So much for Fracastorio.

⁸[Gil78, pp. 27–28].

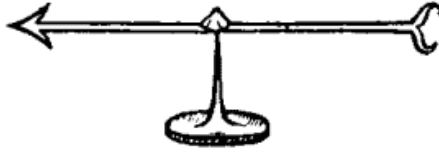


FIG. 3.3 : Le versorium de Gilbert.

le support. À cet égard, il ressemble beaucoup à une boussole classique, à la différence près que l'élément horizontal n'est pas magnétisé comme dans une boussole. Conceptuellement, la capacité de l'élément horizontal à tourner librement signifie qu'il est très sensible aux couples externes extrêmement faibles et peut donc être utilisé pour les détecter, de la même manière qu'une boussole détecte le couple magnétique de la Terre.

Au repos, il pointe dans une direction horizontale arbitraire (il peut pointer dans la direction est-ouest, par exemple, ou vers un arbre).

3.2 Fabriquer un versorium

Il existe trois façons différentes de construire un versorium.

3.2.1 Versorium du premier type

Le versorium du premier type est similaire à celui de Gilbert. Il peut être construit en fixant une épingle, un cure-dent ou un clou, pointe vers le haut, sur une base rigide. La base doit être lourde ou fixée à une table afin d'éviter que l'instrument ne tombe. Le support vertical peut être un bouchon de liège avec une épingle, un cure-dent planté verticalement dans de la pâte à modeler ou une fine planche avec un clou. La seule exigence est que le support reste fixe par rapport au sol, tandis que la partie horizontale peut tourner librement dans un plan horizontal au-dessus de l'axe vertical formé par le support. La partie horizontale mobile est soutenue en son centre par la pointe de l'épingle.

Il est important de noter que pour éviter que la partie mobile ne tombe, il est essentiel que son centre de gravité soit situé en dessous du point de contact entre celle-ci et la pointe du support vertical. Une discussion détaillée du centre de gravité (CG) et des procédures expérimentales permettant de le déterminer se trouve dans le livre *Archimedes, the Center of Gravity, and the First Law of Mechanics*.⁹

Il existe plusieurs façons de placer le CG d'une partie mobile sous son point de contact avec l'épingle. Par exemple, la partie mobile peut avoir la forme d'une lettre *V* à l'envers, ou son centre (qui sera en contact avec l'épingle) peut être courbé vers le haut de telle sorte que, lorsqu'elle est placée sur l'épingle, la pointe de celle-ci se trouve au-dessus du plan de la partie mobile plate. Une pièce mobile simple peut être

⁹[Ass08a] et [Ass08b].

fabriquée à partir d'une attache-papier en laiton ou en acier. Dans ce cas, il est préférable de plier légèrement le centre de la base circulaire de l'attache-papier. Cette partie pliée sera soutenue par l'épingle. Pour plier l'attache-papier, nous utilisons un clou et un marteau, mais avec précaution, sans percer de trou dans la partie supérieure de l'attache-papier, en le pliant légèrement pour créer une petite indentation. La partie mobile sera soutenue par cette partie pliée placée sur la pointe de l'épingle de manière à ne pas glisser de l'épingle. Une fois que les pattes de l'attache-papier ont été pliées vers le bas de manière à former une lettre *V* à l'envers, l'attache-papier peut être placée sur l'épingle.

La partie mobile peut également être fabriquée à partir d'une bande d'aluminium (que l'on peut obtenir en découpant une canette de boisson gazeuse), d'une paille sèche, de bois, de carton fin ou d'un morceau de plastique (une bande de plastique dur). L'important est de donner à la partie mobile la forme d'un *V* inversé. Le plastique dur peut également être plié de manière à ce que les deux pattes soient orientées vers le bas. Lorsque la partie mobile est placée sur l'épingle, il est important de vérifier qu'elle peut tourner librement dans le sens des aiguilles d'une montre dans un plan horizontal, et aussi dans le sens inverse, sans glisser ni coller en raison du frottement avec l'épingle. Elle est alors prête pour les expériences.

Le versorium du premier type est représenté par la figure 3.4. Dans (a), nous avons la base du versorium (dans ce cas, une épingle fixée dans un bouchon de liège). La partie mobile est représentée par la figure 3.4 (b). Dans ce cas, il s'agit d'une attache-papier en acier vue de dessus et de côté, dont le centre de la tête est légèrement courbé et les pattes inclinées vers le bas. Le versorium complet, monté avec le centre de l'attache-papier placé sur la pointe de l'épingle, est représenté par la figure 3.4 (c).

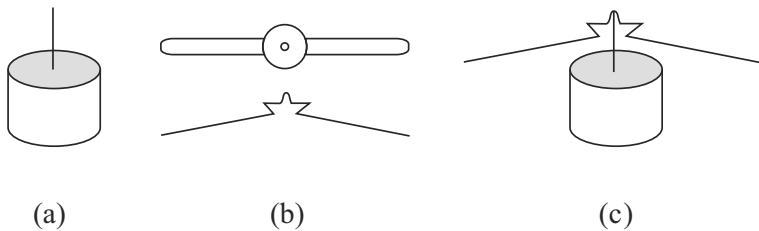


FIG. 3.4 : Versorium du premier type. (a) Base du versorium. (b) Attache-papier en acier vue de dessus et de côté. (c) Le versorium monté.

3.2.2 Versorium du second type

La deuxième façon de fabriquer un versorium consiste à fixer une épingle à la partie mobile horizontale du versorium. Nous appellerons cette partie mobile le « chapeau », qui peut être une bande de plastique ou de métal. L'épingle est solidement fixée au centre du chapeau, sa pointe dirigée vers le bas. L'épingle tourne avec le chapeau. Ce système est ensuite soutenu par une petite surface plane horizontale fixée au sol, comme la tête d'un clou enfoncé dans une planche ou un bouchon. La figure 3.5 représente ce type de versorium. (a) Sa base, dans ce cas un clou enfoncé dans une planche.

(b) La partie mobile du versorium, dans ce cas une bande de plastique ou de métal avec une épingle fixée en son centre, la pointe vers le bas. (c) Le versorium complet, avec la pointe de l'épingle posée sur la tête horizontale du clou enfoncé dans une planche.

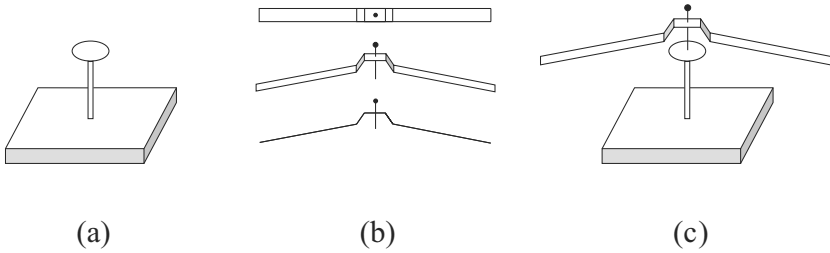


FIG. 3.5 : Versorium du deuxième type, avec l'épingle fixée sur la partie mobile du versorium. (a) Base fixe du versorium. (b) Chapeau du versorium (bande en plastique ou en métal) avec l'épingle fixée dessus. (c) Versorium monté.

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. Le centre de gravité de l'épingle seule se trouve en un point A situé entre la tête H et la pointe T de l'épingle, figure 3.6 (a). Normalement, ce point A sera plus proche de H que de T , bien que nous le représentions ici près du centre de l'épingle. Le centre de gravité du chapeau seul se trouve en un point B situé sur son axe de symétrie vertical, entre ses parties supérieure et inférieure, figure 3.6 (b).

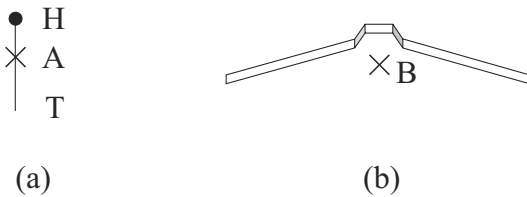


FIG. 3.6 : (a) Le centre de gravité de l'épingle est A . (b) Le point B est le centre de gravité du chapeau.

Le centre de gravité de l'ensemble de la partie mobile (chapeau et épingle) de ce type de versorium est situé en un point C entre A , le centre de gravité de l'épingle, et B , le centre de gravité du chapeau. Il existe trois possibilités, comme le montre la figure 3.7. (a) Si l'épingle a le même poids que le chapeau, alors C se trouvera au milieu entre A et B . (b) Si l'épingle est plus lourde que le chapeau, C sera plus proche de A . (c) Si l'épingle est plus légère que le chapeau, C sera plus proche de B .

Si C est plus haut que la pointe T de l'épingle, le versorium glissera du clou, rendant impossible son équilibre au-dessus du clou. La raison en est que la partie mobile du versorium sera en équilibre instable dans cette configuration. Dans la figure 3.8 (a), nous illustrons cette situation d'équilibre instable avec le point C (de la figure 3.7) représenté par le symbole \times . Ici, \times est verticalement au-dessus de T , à sa position la

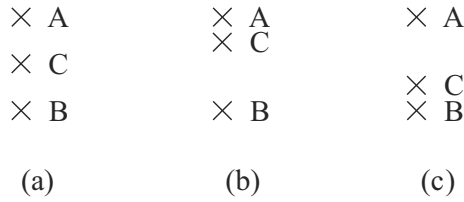


FIG. 3.7 : Emplacement du centre de gravité C de la partie mobile du versorium.
 (a) Épingle et chapeau de même poids. (b) Épingle plus lourde que le chapeau.
 (c) Épingle plus légère que le chapeau.

plus haute. Supposons que la partie mobile s'écarte légèrement de cette situation instable, c'est-à-dire que la partie mobile s'incline légèrement dans le sens des aiguilles d'une montre (ou le sens inverse) autour de la pointe T de l'épingle, ce qui abaisse l'une de ses pattes tout en relevant l'autre. Dans ce cas, le centre de gravité \times de la partie mobile se déplacera en dessous de sa position initiale. Le centre de gravité de tout système a tendance à se rapprocher de la surface de la Terre lorsque cette possibilité existe. Par conséquent, le versorium continuera à tourner dans le même sens, ce qui entraînera la chute de la partie mobile.

La seule façon d'équilibrer la partie mobile du versorium au-dessus du clou est d'avoir le point C sous la pointe T de l'épingle. Ceci est représenté dans la figure 3.8(b), le symbole \times indiquant la position du centre de gravité de la partie mobile du versorium (composée de l'épingle et du chapeau). Il s'agit de la configuration d'équilibre stable, avec \times dans sa position la plus basse, c'est-à-dire verticalement en dessous de la pointe T de l'épingle. Dans cette configuration stable, tout mouvement du versorium dans le sens des aiguilles d'une montre ou le sens inverse autour de la pointe T de l'épingle élèvera le centre de gravité \times par rapport à sa hauteur lorsqu'il se trouvait verticalement sous la pointe T . Le système reviendra alors à la configuration d'équilibre stable en raison du couple de rappel gravitationnel exercé sur lui par la Terre.

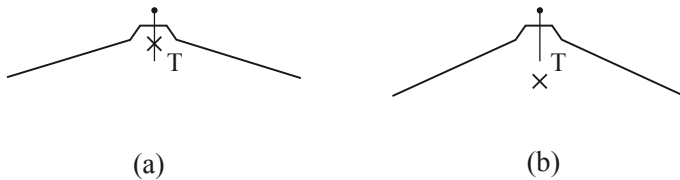


FIG. 3.8 : Le symbole \times représente le centre de gravité C de la partie mobile du versorium (composée de l'épingle et du chapeau). (a) Versorium du deuxième type en équilibre instable, avec \times au-dessus de la pointe T de l'épingle. (b) Versorium en équilibre stable, avec \times en dessous de la pointe T .

Il est parfois difficile d'obtenir cette configuration d'équilibre stable avec une partie mobile légère constituée d'une paille en plastique. Pour éviter ce problème, on peut utiliser une paille à l'intérieur d'une autre paille, ou une bande en plastique constituée d'un matériau plus dense et plus lourd, afin de contrebalancer le poids de l'épingle.

Une autre alternative consiste à couper la partie supérieure plus lourde de l'épingle (y compris la tête) à l'aide d'une pince, en ne conservant que la partie inférieure (y compris la pointe). Vous pouvez également plier les pattes du chapeau du versorium vers le bas afin d'abaisser son centre de gravité ou simplement utiliser des chapeaux plus longs. Une autre alternative consiste à remplacer l'épingle par un petit clou traversant le centre de la partie mobile, ou collé à son centre avec de la colle ou de la pâte à modeler. Lorsque le système est prêt, il est important de vérifier s'il peut tourner librement dans les deux sens dans un plan horizontal autour d'un axe vertical sans glisser. S'il glisse sur le côté, vous pouvez l'équilibrer en abaissant l'une des pattes ou en augmentant la longueur de l'une d'entre elles. Nous sommes alors prêts à commencer les expériences.

3.2.3 Versorium du troisième type

La troisième façon de fabriquer un versorium est peut-être la plus simple. Pour la partie mobile, nous choisissons une bande en métal, en bois ou dans un autre matériau approprié, et nous y attachons un fil de coton ou de soie en son centre. La bande doit rester horizontale lorsqu'elle est au repos et attachée par son centre. Nous fixons ensuite l'extrémité supérieure du fil à un support fixé par rapport au sol. La partie mobile attachée à l'extrémité inférieure du fil peut alors tourner librement à l'horizontale dans les deux sens autour du fil vertical. La figure 3.9 illustre ce type de versorium dont la partie mobile est soutenue en son centre par un fil vertical attaché à un crayon. Le «perpendiculaire» de Fracastoro était probablement un versorium de ce type.

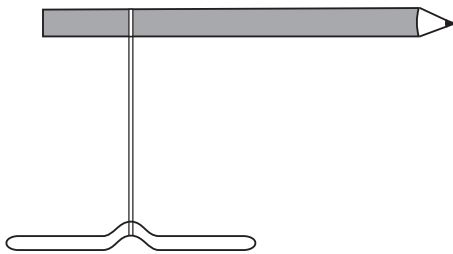


FIG. 3.9 : Versorium du troisième type.

Le versorium du troisième type possède une propriété qui le différencie des deux autres types. La partie mobile des versoria des premier et second types ne peut que s'incliner ou pivoter autour de leur centre, qui reste immobile par rapport au sol. Le versorium du troisième type, en revanche, peut non seulement tourner autour d'un axe vertical, mais aussi, comme un pendule, se déplacer dans son ensemble lorsqu'il est attiré par un autre corps. Cela présente un avantage en termes de polyvalence de son mouvement. Cependant, cela complique parfois l'analyse des phénomènes que nous souhaitons décrire ou observer. Dans les expériences suivantes, nous n'utilisons initialement que des versoria des premier et second types.

À couple externe constant, il est plus facile de faire tourner une partie mobile plus légère d'un versorium qu'une partie plus lourde. Cela signifie qu'un versorium léger

a une plus grande sensibilité qu'un versorium lourd.

Bien que Gilbert n'ait construit que des versoria en métal, ceux-ci peuvent être fabriqués à partir de différents matériaux : métal, plastique, carton fin, paille sèche, bois, etc. Au départ, nous ne travaillerons qu'avec des versoria en métal, que nous appellerons simplement versoria. Lorsque l'aiguille tournante est en plastique, en papier ou en un autre matériau non métallique, nous appellerons le système versorium en plastique, versorium en papier ou tout autre nom approprié. De cette manière, nous pourrions distinguer ces versoria du versorium utilisé par Gilbert.

3.3 Expériences avec le versorium

Expérience 3.1

Nous approchons un plastique neutre d'un versorium métallique, sans les mettre en contact. Rien ne se passe, figure 3.10.

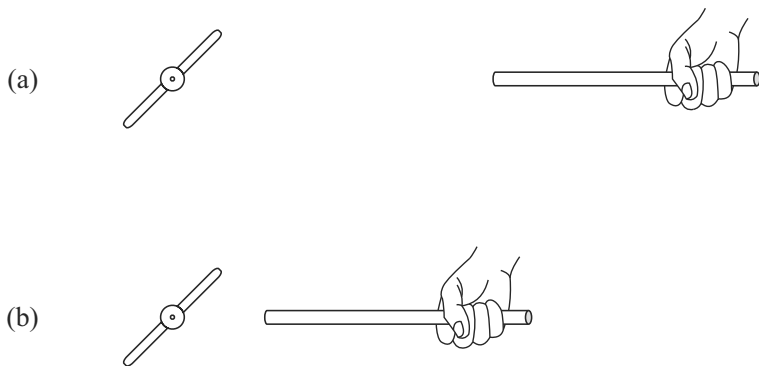


FIG. 3.10 : (a) Un versorium métallique pointe dans une direction arbitraire lorsqu'il est éloigné d'un morceau de plastique neutre. (b) Le versorium reste immobile lorsque le plastique neutre est approché de lui.

Nous frottons un autre morceau de plastique et répétons l'expérience. Dans ce cas, nous observons que le versorium métallique est orienté par le plastique frotté, pointant vers celui-ci, figure 3.11. Il en va de même avec un versorium en bois et un versorium en papier.

Cette expérience montre que le plastique frotté affecte les corps voisins, comme nous l'avons vu dans l'expérience 2.1. Mais il existe deux différences principales entre ces deux expériences. La première différence est que dans l'expérience 2.1, il y avait un mouvement des petits morceaux de papier. Dans la présente expérience, seul le versorium change de direction, tandis que son centre reste immobile au-dessus de l'épingle. La deuxième différence est que le versorium se déplace plus facilement que les morceaux de papier. Autrement dit, certains objets frottés ne peuvent pas attirer vers eux des corps légers. Cependant, ces mêmes objets frottés peuvent déplacer les

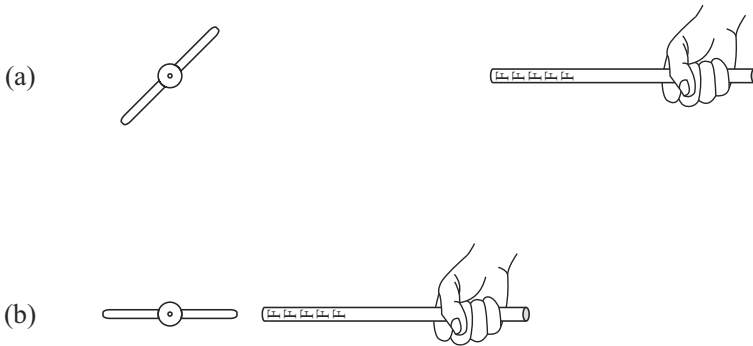


FIG. 3.11 : (a) Un versorium métallique pointe dans une direction arbitraire lorsqu'il est éloigné d'un morceau de plastique frotté. (b) Lorsque le plastique est approché, le versorium s'aligne sur celui-ci et pointe constamment vers le plastique.

versoria métalliques. Le versorium est un meilleur détecteur d'électrisation faible que les morceaux de papier ou de paille. Gilbert a utilisé cette grande sensibilité pour découvrir de nombreux nouveaux objets électriques, c'est-à-dire des objets frottés qui peuvent attirer ou orienter d'autres substances placées à proximité.

Gilbert a décrit le versorium comme suit :^{10,11}

Maintenant, afin de comprendre clairement par l'expérience comment cette attraction se produit, et quelles peuvent être ces substances qui attirent ainsi d'autres corps (et dans le cas de nombreuses substances électriques, bien que les corps influencés par elles se penchent vers elles, ils ne sont pas attirés vers elles en raison de la faiblesse de l'attraction, mais peuvent facilement s'élever), fabriquez-vous une aiguille tournante (électroscope — *versorium*) en métal, de trois ou quatre doigts de long, assez léger, et équilibré sur une pointe acérée à la manière d'un pointeur magnétique. Approchez d'une de ses extrémités un morceau d'ambre ou une gemme, légèrement frotté, poli et brillant : l'instrument se met immédiatement à tourner.

Le mot « électroscope » dans cette citation a été introduit par Mottelay dans sa traduction anglaise de l'ouvrage de Gilbert. Il n'apparaît pas dans le texte latin original, dans lequel seul le mot « versorium » est utilisé.¹² Le mot « électroscope » n'apparaît pas non plus dans la traduction du livre de Gilbert par Thompson.¹³ Mottelay a utilisé le mot « électroscope » dans le sens où cet instrument pouvait indiquer, par

¹⁰[Gil78, pp. 27–28].

¹¹Now in order clearly to understand by experience how such attraction takes place, and what those substances may be that so attract other bodies (and in the case of many of these electrical substances, though the bodies influenced by them lean toward them, yet because of the feebleness of the attraction they are not drawn clean up to them, but are easily made to rise), make yourself a rotating-needle (electroscope—*versorium*) of any sort of metal, three or four fingers long, pretty light, and poised on a sharp point after the manner of a magnetic pointer. Bring near to one end of it a piece of amber or a gem, lightly rubbed, polished and shining : at once the instrument revolves.

¹²[Gil00a, pp. 48–49 et glossaire] et [Hea67].

¹³[Gil00b, pp. vj et 48–49] et [Hea67].

son orientation, quels objets se comportaient comme l'ambre après avoir été frottés. « Électroscope » est le nom générique de tout dispositif suffisamment sensible pour détecter une force ou un couple d'origine électrique. Dans cet ouvrage, en revanche, nous réserverons le nom « électroscope » spécifiquement à l'instrument décrit dans la section 6.1.

Nous disposons désormais d'un deuxième critère pour affirmer qu'un plastique ou un autre matériau est « électriquement neutre ». Le premier critère a été présenté dans l'expérience 2.1, à savoir ne pas attirer les corps légers. Le deuxième critère est celui de ne pas produire de mouvement d'orientation d'un versorium métallique lorsque ce matériau est placé près d'une des pattes. Dans les expériences suivantes, il est important de conserver une paille ou une règle en plastique neutre qui n'attire pas les corps légers et n'oriente pas les versoria métalliques. Cette paille ou cette règle ne doit en aucun cas être frottée, car elle sera utilisée comme notre norme neutre.

Fracastoro n'a pas décrit comment il a créé le perpendiculaire, qui a précédé le versorium de Gilbert. Nous ne pouvons que spéculer sur la manière dont il l'a fabriqué. L'un des objectifs de son livre était l'étude du magnétisme. Il voulait également distinguer l'attraction de l'ambre de celle exercée par un aimant naturel. Peut-être a-t-il frotté un morceau d'ambre afin de réaliser une expérience électrique et a-t-il remarqué par hasard qu'il était capable de faire tourner l'aiguille d'une boussole. L'ambre n'étant pas magnétique, qu'il soit frotté ou non, il aurait dû conclure que cette orientation de la boussole était due à une attraction électrique, analogue à l'attraction des corps légers par l'ambre frotté. Il aurait alors pu décider de fabriquer des aiguilles métalliques analogues aux aiguilles magnétiques, mais non magnétisées. Elles auraient tourné vers un morceau d'ambre frotté, mais pas vers un aimant (en supposant que les aiguilles étaient en cuivre ou en argent, et non en fer ou en acier). Il aurait ainsi créé le premier instrument artificiel pour l'étude de l'électricité.

Expérience 3.2

Nous approchons un aimant d'un versorium. Nous constatons que seuls les versoria en acier, en fer, en nickel ou en autres matériaux ferromagnétiques tournent et s'orientent vers l'aimant. Les versoria fabriqués à partir d'autres matériaux ne sont pas affectés par l'aimant. Nous constatons également que plusieurs métaux, comme le cuivre et l'aluminium, ne sont pas affectés par l'aimant. Il en va de même pour la plupart des substances (papier, plastique, bois, etc.).

Cette expérience nous permet de distinguer l'interaction magnétique de l'interaction électrique, comme nous l'avons fait précédemment avec les expériences 2.6 et 2.7, mais avec une plus grande précision.

3.4 Est-il possible de cartographier la force électrique ?

Est-il possible de cartographier la force électrique exercée par un corps en plastique frotté ? Peut-on visualiser dans quelle direction une longue paille frottée attirera

un morceau de papier placé à proximité ? Dans cette section, nous répondons à cette question.

Dans les expériences suivantes, nous pouvons utiliser plusieurs versoria simultanément. Nous pouvons également utiliser un seul versorium placé alternativement dans plusieurs positions autour du corps frotté pour chaque expérience. Dans les figures suivantes, nous montrons plusieurs versoria en même temps. Il est préférable d'utiliser de petits versoria, tels que ceux fabriqués à partir de petites attaches-papier placées sur des épingles. Ces épingles peuvent être fixées à plusieurs bouchons en liège ou toutes enfoncées dans un panneau de polystyrène. Au départ, nous travaillons uniquement avec des versoria en métal.

Expérience 3.3

Nous approchons une paille neutre près des versoria, rien ne se passe. Nous frottons l'extrémité d'une autre paille en plastique. Nous plaçons cette extrémité frottée à la même hauteur que le plan formé par plusieurs versoria sur une table. Nous observons qu'elles tournent et pointent vers l'extrémité frottée de la paille, figure 3.12. Dans cette figure, le cercle central avec la lettre F indique l'extrémité frottée de la paille. L'influence de la paille frottée s'étend sur environ 10 cm. Les versoria les plus éloignées ne semblent pas être affectées par la paille frottée, à moins qu'elle ne soit placée près d'elles.

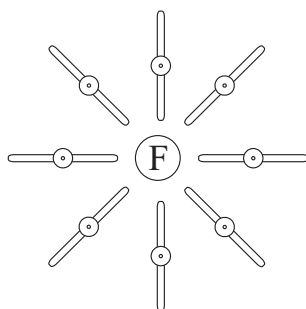


FIG. 3.12 : Les versoria voisines sont orientées vers l'extrémité frottée du plastique.

Les orientations indiquées par les versoria représentent les directions de la force électrique exercée par le plastique frotté. Autrement dit, s'il y a des morceaux de papier à l'emplacement des versoria et si la force d'attraction de la paille frottée est suffisamment forte, l'orientation des versoria indique les directions du mouvement qui serait produit sur les morceaux de papier en raison de la présence du plastique frotté. Cela signifie qu'ils seraient attirés radialement vers la pointe frottée.

Dans cette expérience, les versoria fonctionnent comme des limailles de fer réparties autour d'un aimant permanent, indiquant les directions des forces magnétiques exercées par l'aimant sur d'autres pôles magnétiques ou de petits morceaux de fer.

Expérience 3.4

Des expériences analogues peuvent être réalisées pour différentes configurations. Par exemple, nous pouvons frotter une paille en plastique sur toute sa longueur, puis la placer verticalement sur une base, telle qu'un cure-dent enfoncé dans de la pâte à modeler. La versoria voisine pointera vers la paille frottée.

Nous pouvons également soutenir cette paille frottée horizontalement en la fixant aux extrémités. La configuration finale des versoria dans ce cas est similaire à celle de la figure 3.13. La plupart des versorias pointeront vers ces extrémités.

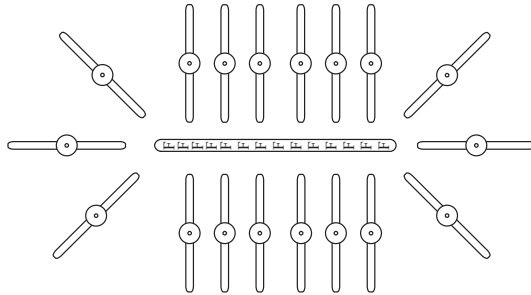


FIG. 3.13 : Orientation de versoria vers une paille horizontale qui a été frottée sur toute sa longueur.

Expérience 3.5

Nous répétons maintenant ces expériences en utilisant deux pailles frottées placées verticalement. Dans ce cas, la configuration des versoria est illustrée à la figure 3.14. Les cercles marqués de la lettre F représentent les parties frottées des pailles qui se trouvent au même niveau que les versoria. Cette configuration indique une addition vectorielle des couples exercés par chaque paille en plastique sur les versoria. Les vecteurs s'additionnent pour produire la résultante selon la règle du parallélogramme.

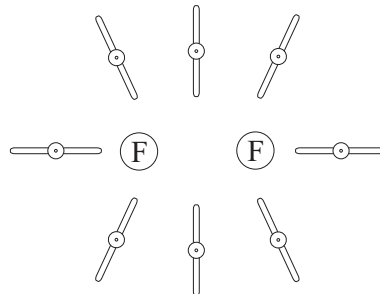


FIG. 3.14 : Orientation de versoria grâce à deux pailles en plastique frottées.

Il est intéressant de noter que Gilbert n'a pas utilisé de versorium pour cartographier la force électrique comme nous le faisons ici. Mais il a utilisé des aiguilles de boussole magnétisées pour cartographier la force magnétique d'un aimant. Dans la figure 3.15, nous montrons les résultats qu'il a obtenus pour des aimants cylindriques et sphériques.¹⁴ L'aimant sphérique oriente les boussoles de manière analogue à l'orientation des boussoles au-dessus de la Terre, qui pointent vers les pôles magnétiques nord et sud. En d'autres termes, le petit aimant sphérique possède également deux pôles, qui sont les points de la surface de la sphère près desquels les boussoles restent perpendiculaires à la surface de la sphère, pointant vers le centre de la sphère. Il est possible de tracer les méridiens magnétiques sur la surface de cette sphère. Ce sont des cercles reliant ces deux pôles, dont les centres coïncident avec le centre de la sphère. L'équateur magnétique est le grand cercle dont le plan est perpendiculaire à la ligne reliant les deux pôles. Le centre de l'équateur magnétique coïncide avec le centre de la sphère. Gilbert a utilisé cette analogie entre le comportement des petites boussoles près d'une petite sphère magnétisée et le comportement des boussoles normales à la surface de la Terre pour affirmer que la Terre est un énorme aimant. Grâce à ce modèle, il a pu justifier l'orientation des boussoles normales utilisées dans la navigation terrestre.

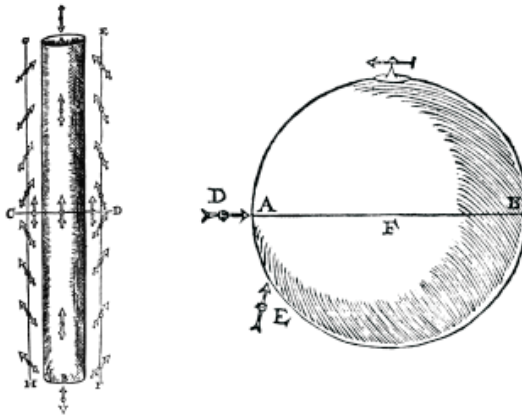


FIG. 3.15 : Cartographie de la force magnétique réalisée par Gilbert à l'aide d'aiguilles aimantées approchées d'aimants cylindriques et sphériques. Les pôles de cet aimant sphérique sont situés en *A* et *B*.

3.5 Y a-t-il action et réaction en électrostatique ?

Jusqu'à présent, nous avons vu que l'ambre frotté, ou le plastique frotté, attire et déplace des objets légers et fait tourner les versoria. Nous allons maintenant analyser le processus inverse.

¹⁴[Gil78, pp. 10 et 82].

Expérience 3.6

Une paille en plastique neutre est placée en contact avec un mur et lâchée sans la bouger. Elle tombe au sol, figure 3.16 (a). Nous frottons une autre paille sur toute sa longueur avec un morceau de papier ou des cheveux. Nous la plaçons ensuite en contact avec le mur et la lâchons sans la bouger. Nous voyons qu'elle reste collée au mur malgré l'attraction gravitationnelle de la Terre, figure 3.16 (b). Le même effet est observé lorsqu'elle touche une vitre, un meuble métallique ou un tableau noir d'école. Elle peut même coller au plafond !

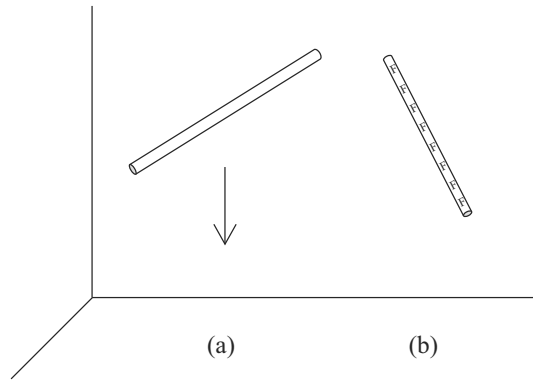


FIG. 3.16 : (a) Une paille en plastique neutre tombe au sol après avoir été lâchée. (b) Une paille en plastique frottée sur toute sa longueur reste collée à un mur après avoir été lâchée.

Cette expérience peut également être utilisée pour déterminer si une paille est bien électrisée. Si elle reste collée au mur après avoir été frottée, cela signifie qu'elle est bien électrisée. Si elle glisse ou tombe au sol très rapidement après avoir été frottée et relâchée, cela signifie qu'elle est faiblement électrisée. La plupart des expériences présentées dans ce livre fonctionneront si nous utilisons des pailles en plastique bien électrisées. Ce test mural peut être utilisé pour découvrir les matériaux capables de stocker une grande quantité d'électricité, ainsi que les meilleures méthodes ou les plus efficaces pour appliquer la friction. Par exemple, comment obtenir une meilleure électrisation : en frottant une paille dans des cheveux, avec un morceau de papier ou avec un sac en plastique ? Ce test mural est une méthode très utile, pratique et simple pour vérifier l'électrisation d'une paille en plastique.

Parfois, la paille frottée ne colle pas au mur, même après une friction importante. Cela peut se produire avec des pailles denses et lourdes. Dans ce cas, le poids de la paille sera supérieur à la force électrique, mais aussi à la force de friction entre la paille frottée et le mur. La paille tombera donc au sol. Lorsque cela se produit, il est préférable d'utiliser un autre type de paille, plus fine et plus légère.

Le même test peut être effectué avec un morceau de sac en plastique à la place d'une paille. Un morceau de sac en plastique neutre tombera au sol après avoir été placé contre un mur et avoir été relâché. En revanche, un morceau de sac en plastique frotté restera collé au mur pendant longtemps.

Expérience 3.7

Une expérience analogue peut être réalisée avec un ballon en caoutchouc gonflé. Lorsque nous le plaçons contre un mur et le relâchons, il tombe au sol. Nous frottons ensuite le ballon dans des cheveux. Nous plaçons la partie frottée du ballon contre un mur et le relâchons. S'il est bien électrisé, il restera collé au mur après avoir été relâché. Pour que cette expérience réussisse, le ballon doit être frotté vigoureusement sur une grande surface.

Ce sont des expériences très simples, mais les résultats sont impressionnants. Parfois, la paille peut rester collée au mur pendant plusieurs minutes, voire une heure. Les expériences indiquent que la paille frottée est attirée par le mur ou par le plafond. La paille frottée est attirée par plusieurs substances différentes : mur, verre, métal, bois, etc.

Expérience 3.8

Nous réalisons maintenant quelques expériences avec un versorium en plastique, similaire au versorium du second type. Au départ, nous travaillons avec un versorium neutre qui peut tourner librement dans les deux sens autour d'un axe vertical passant par son centre. Nous approchons plusieurs objets de l'une des pattes du versorium. Ces objets peuvent être un doigt, une cuillère ou un fil métallique, une brochette en bois de barbecue, une feuille de papier ou un morceau de tissu. Chaque corps est déplacé près du versorium séparément des autres. Rien ne se passe avec le versorium. Autrement dit, son orientation arbitraire précédente n'est pas affectée, figure 3.17.

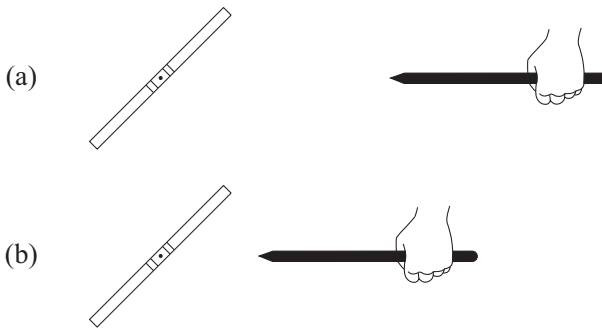


FIG. 3.17 : Un versorium en plastique neutre n'est pas orienté lorsqu'un doigt, un morceau de métal, de bois, de papier ou de tissu est approché de l'une de ses pattes.

Nous frottons maintenant uniquement l'une des pattes du versorium en plastique avec une feuille de papier ou un chiffon. Nous répétons la procédure lorsque nous approchons un doigt de cette patte frottée. Nous pouvons également déplacer un morceau de métal ou de bois près de la patte frottée du versorium en plastique. Cette fois, nous observons que la patte frottée du versorium en plastique pivote pour pointer vers l'objet qui s'approche, comme dans la figure 3.18.

Cette expérience montre le contraire de l'expérience 3.1. Auparavant, un morceau

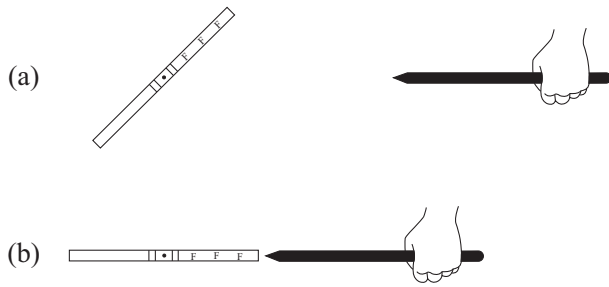


FIG. 3.18 : (a) Le versorium en plastique pointe dans une direction arbitraire lorsqu'il est éloigné d'une brochette en bois. (b) La patte frottée d'un versorium en plastique est orientée vers une brochette en bois placée à proximité.

de plastique frotté orientait un versorium métallique. Nous constatons maintenant qu'un doigt, un morceau de bois ou de métal oriente un versorium en plastique frotté.

Dans certains cas, un versorium en plastique qui n'a pas été frotté intentionnellement est attiré par un doigt ou une feuille de papier. Comme nous l'avons mentionné précédemment, cela est dû au fait que parfois, le simple fait de manipuler le versorium en plastique suffit à le charger électriquement. Si cela se produit, cela indique que le versorium en plastique n'est pas vraiment neutre, mais qu'il a plutôt acquis une charge électrique résiduelle en étant manipulé. Les versoria en plastique qui sont vraiment neutres sont ceux qui ne sont ni attirés ni orientés par ces objets.

Expérience 3.9

Dans l'expérience 3.8, nous avons observé l'orientation d'un versorium en plastique, mais son centre est resté immobile sur le support. La meilleure façon de voir un corps en plastique frotté être attiré par un métal est de travailler avec un versorium du troisième type (voir section 3.1), mais cette fois-ci en plastique, c'est-à-dire une bande de plastique suspendue en son centre par un fil de soie ou de nylon. Plus la bande est légère, plus elle se déplacera facilement dans son ensemble. D'un autre côté, elle ne doit pas être trop courte, car nous devons la frotter dans des cheveux, avec une feuille de papier ou avec un tissu. Une paille en plastique convient parfaitement comme versorium de ce type en raison de sa grande longueur et de son faible poids. Si nous approchons notre main, une feuille de papier ou une plaque métallique de ce versorium neutre, rien ne se passe.

Nous frottons maintenant la moitié du versorium en plastique (c'est-à-dire que nous ne frottons qu'une de ses pattes) et le suspendons à l'aide du fil de soie ou de nylon. Nous approchons à nouveau notre main du versorium. Nous pouvons également approcher une feuille de papier, une brochette en bois pour barbecue ou une plaque métallique du versorium. Cette fois-ci, le versorium en plastique frotté ne se tourne pas seulement vers l'objet qui s'approche, mais se déplace également dans son ensemble vers celui-ci. Autrement dit, un couple net et une force nette agissent sur lui. Cela le fait être attiré par l'objet qui s'approche.

Cette expérience est l'opposé des expériences 2.1, 2.3 et 2.4. Nous avons maintenant une feuille de papier ou une plaque métallique qui attire un morceau de plastique frotté. Dans le cas des expériences 2.1, 2.3 et 2.4, il n'était pas possible d'observer ou de détecter cette action mutuelle, car la paille, la règle ou le peigne en plastique étaient beaucoup plus lourds que les morceaux de papier et les autres petits objets. De plus, la main d'une personne n'est pas assez sensible pour détecter la faible force exercée par les morceaux de papier sur la paille ou le peigne en plastique. Dans les expériences 3.8 et 3.9, en revanche, nous disposons d'un instrument beaucoup plus sensible. Cela s'explique par le fait que le poids du corps testé (dans ce cas, la bande en plastique du versorium) est contrebalancé par le support situé en dessous ou au-dessus. Le poids du versorium en plastique étant équilibré par une autre force, il est alors beaucoup plus facile de voir ou de détecter sa rotation ou son mouvement latéral dû à une influence externe.

Expérience 3.10

Le fait qu'un corps chargé électriquement soit attiré par d'autres corps proches (un doigt, un morceau de bois ou un morceau de métal) a été utilisé par Stephen Gray (1666–1736) en 1720 pour découvrir de nouveaux matériaux électriques (c'est-à-dire des matériaux qui se comportent comme l'ambre).

Gray a frotté plusieurs substances entre ses doigts. Après cette procédure, il a vérifié si les substances étaient attirées par un doigt ou un autre corps solide lorsqu'elles étaient approchées des substances frottées. Nous citons ici des extraits de son ouvrage décrivant des expériences faciles à reproduire :^{15,16}

Ayant souvent observé, lors d'expériences électriques réalisées avec un tube de verre [frotté] et une plume de duvet attachée à l'extrémité d'un petit bâton, qu'après que ses fibres aient été attirées vers le tube, lorsque celui-ci était retiré, la plupart d'entre elles étaient attirées vers le bâton, comme si la plume était

¹⁵[Gra20, pp. 104–106].

¹⁶Having often observed in the Electrical Experiments made with a [rubbed] Glass Tube, and a Down Feather tied to the end of a small Stick, that after its Fibres had been drawn towards the Tube, when that [the tube] has been withdrawn, most of them would be drawn to the Stick, as if it [the down feather] had been an Electric Body, or as if there had been some Electricity communicated to the Stick or Feather; this put me upon thinking, whether if a Feather were drawn through my Fingers, it might not produce the same Effect, by acquiring some degree of Electricity. This succeeded accordingly upon my first trial, the small downy Fibres of the Feather next the Quill being drawn by my Finger when held near it : [...] I then proceeded to try whether Hair might not have the same Property, by taking one from my Wig, and drawing it 3 or 4 times through my Fingers, or rather between my Thumb and Forefinger, and soon found it would come to my Finger at the distance of half an Inch [1.3 cm] : [...].

Having succeeded so well in these [experiments], I proceeded to larger quantities of the same Materials, as pieces of Ribband both of coarse and fine Silk of several colours, and found that by taking a piece of either of these of about half a yard long [45 cm], and by holding the end in one Hand, and drawing it through my other Hand between my Thumb and Fingers, it would acquire an Electricity, so that if the Hand were held near the lower end of it, it would be attracted by it at the distance of 5 or 6 inches [13 or 15 cm] ; but at some times the Electricity would be much weaker than at others, the reason of which I conjectur'd to be, that the Ribband might have imbibed some aqueous Particles from the moist Air, which I found to be [true] upon trial the occasion of it ; for when I had well warmed the Ribband by the Fire, it never failed to be strongly Electrical.

un corps électrique ou comme si une certaine quantité d'électricité avait été communiquée au bâton ou à la plume ; cela m'a amené à me demander si, en passant une plume entre mes doigts, je ne pourrais pas produire le même effet, en acquérant un certain degré d'électricité. Cela a fonctionné dès mon premier essai, les petites fibres duveteuses de la plume, près de la tige, étant attirées par mon doigt lorsque je le tenais près d'elle : [...] J'ai ensuite cherché à savoir si les cheveux pouvaient avoir la même propriété, en prenant un de ma perruque et en le passant trois ou quatre fois entre mes doigts, ou plutôt entre mon pouce et mon index, et j'ai rapidement constaté qu'il venait à mon doigt à une distance d'un demi-pouce [1,3 cm] ; [...]

Ayant si bien réussi ces [expériences], je passai à des quantités plus importantes des mêmes matériaux, comme des morceaux de ruban de soie grossière et fine de plusieurs couleurs, et je constatai qu'en prenant un morceau de l'un ou l'autre d'environ une demi-verge de long [45 cm], et en tenant l'extrémité dans une main et en la tirant à travers mon autre main entre mon pouce et mes doigts, il acquérait une électricité telle que si la main était tenue près de son extrémité inférieure, elle était attirée par lui à une distance de 5 ou 6 pouces [13 ou 15 cm] ; mais parfois, l'électricité était beaucoup plus faible qu'à d'autres moments, ce que j'ai attribué au fait que le ruban avait peut-être absorbé des particules aqueuses provenant de l'air humide, ce que j'ai constaté être [vrai] après l'avoir testé à cette occasion ; car lorsque j'avais bien réchauffé le ruban près du feu, il acquérait toujours une forte charge électrique.

3.6 Fabri et Boyle découvrent l'action électrique mutuelle

Les expériences 3.6 à 3.10 sont très importantes. Elles montrent qu'il existe une action réciproque entre le plastique frotté et les objets qui l'entourent. Le plastique frotté attire ces objets qui, à leur tour, attirent le plastique frotté. Gilbert n'a réalisé aucune expérience avec un versorium frotté fait d'ambre ou de toute autre substance électrique (c'est-à-dire toute substance qui se comportait comme l'ambre, comme il les appelait). Ce fait a peut-être contribué à sa croyance erronée selon laquelle il n'y avait pas d'action réciproque entre l'ambre frotté et les objets environnants. Le même point de vue erroné a été adopté par Girolamo Cardano (1501–1576) avant Gilbert, et a également été mentionné par N. Cabeo (1596–1650) après Gilbert. Cependant, ils étaient tous conscients de l'action mutuelle entre deux aimants, ou entre un aimant et un morceau de fer. Afin de caractériser cette action magnétique mutuelle, Gilbert a adopté les noms « coition » ou « confluence », tandis que pour l'action électrique, il a utilisé le terme « attraction ».¹⁷

Nous savons aujourd'hui que l'action électrique est également mutuelle et qu'elle peut donc être caractérisée par l'expression « interaction électrique ». L'interaction électrique fait référence à la fois à la force nette exercée par un objet sur un autre (les amenant à se déplacer par rapport au sol) et au couple net exercé par un objet sur un autre (les amenant à tourner par rapport au sol). Lorsque nous parlons de force électrique, il faut garder à l'esprit que non seulement l'objet *A* attire l'objet *B*, mais que

¹⁷[Gil78, pp. 26 et 34] et [Hei99, pp. 174–182].

l'objet B attire également l'objet A dans la direction opposée. De même, si l'objet A exerce un couple électrique sur l'objet B , l'objet B exercera un couple opposé sur l'objet A . Si l'objet A a tendance à tourner dans le sens des aiguilles d'une montre sous l'influence de l'objet B , alors B aura tendance à tourner dans le sens inverse des aiguilles d'une montre sous l'influence de A .

Les premiers à découvrir que l'action électrique est une action mutuelle entre l'ambre frotté et les objets qui l'entourent furent Honoré Fabri (1607–1688) en 1660, figure 3.19, et Robert Boyle (1627–1691) en 1675, figure 3.20.¹⁸



FIG. 3.19 : Honoré Fabri (1607–1688).



FIG. 3.20 : Robert Boyle (1627–1691).

Fabri devint membre correspondant de l'Accademia del Cimento en 1660. Parmi les membres de l'Accademia figuraient G. A. Borelli (1608–1671), Vincenzo Viviani (1622–1703) – qui était un disciple de Galilée (1564–1642) – et F. Redi (1626–1697/8). Elle fut fondée en 1657 et exista 10 ans. Les travaux de l'Accademia, appelés *Saggi* ou *Essais*,

¹⁸[Hei99, pp. 195–205].

furent publiés en 1667. Les études sur l'électricité menées au sein de cette Accademia débutèrent en 1660. Parmi ses rapports, on trouve les commentaires suivants :^{19,20}

On croit généralement que l'*ambre* attire les petits corps vers lui, mais cette action est en réalité *réciproque* et n'appartient pas plus à l'*ambre* qu'aux corps déplacés, par lesquels il est lui-même attiré.

Selon Heilbron, les académiciens ont vérifié cela en suspendant un morceau d'ambre frotté à un fil ou en le plaçant sur un pivot. L'ambre, selon les académiciens,²¹

s'inclinait légèrement vers ces petits corps, qui se présentaient également *proportionnellement* à lui, et obéissaient volontiers à son appel.

La même année, Magalotti (1637–1712) réfuta les points de vue de Cabeo, qui avait rejeté la nature mutuelle des interactions électriques. Magalotti déclara :^{22,23}

Ses opinions sont réfutées par l'expérience, car l'*ambra versoria* suit tous les corps qui lui sont présentés.

Selon Heilbron, Magalotti obtint cette information de Fabri et les rapports précédents de l'Accademia del Cimento étaient également dus à Fabri. Il existe un manuscrit contenant des brouillons pour une section sur l'électricité des *Essais*, dans la lettre de Fabri, mentionnant :^{24,25}

un morceau de cire à cacheter suspendu librement puis frotté s'approche d'autres corps.

Ces déclarations nous permettent de constater que ses expériences étaient similaires à celles présentées dans la section 3.5, dans laquelle nous avons utilisé du plastique frotté à la place de l'ambre ou de la cire frottés.

Boyle a présenté ses résultats sur l'action mutuelle entre l'ambre frotté et les objets à proximité en 1675. Il a peut-être appris cela grâce aux rapports de Fabri ou il a peut-être découvert ce fait de manière indépendante. Il pensait que l'ambre émettait un effluve matériel qui lui permettait d'attirer les corps légers, peut-être parce que cet effluve était collant et élastique.

Concernant l'attraction exercée par l'ambre, il a écrit ce qui suit :^{26,27}

¹⁹[Hei99, p. 201]

²⁰It is commonly believed, That *Amber* attracts the little Bodies to itself; but the action is indeed *mutual*, not more properly belonging to the *Amber*, than to the Bodies moved, by which also itself is attracted.

²¹made a little stoop to those little bodies, which likewise *proportionally* presented themselves thereto, and readily obeyed its call.

²²[Hei99, p. 201].

²³His views are refuted by experience, for the *ambra versoria* follows all bodies presented to it.

²⁴[Hei99, p. 202].

²⁵a piece of sealing wax suspended freely and then rubbed approaches other bodies.

²⁶[Boy00, p. 515].

²⁷That 'tis not in any peculiar sympathy between an Electric and a body whereon it operates, that Electrical Attraction depends, seems the more probable, because Amber, for instance, does not attract onely one determinate sort of bodies, as the Loadstone does Iron, and those bodies wherein it abounds; but as far as I have yet tried, it draws indifferently all bodies whatsoever, being plac'd within a due distance from it, (as my choicest piece of Amber draws not onely Sand and Mineral Powders, but Filings of Steel and Copper, and beaten Gold it self) provided they be minute or light enough, except perhaps it be fire;

Il semble plus probable que l'attraction électrique ne dépende pas d'une sympathie particulière entre un corps électrique et un corps sur lequel il agit, car l'ambre, par exemple, n'attire pas uniquement un type déterminé de corps, comme le fait le magnétisme avec le fer et les corps qui en sont riches ; mais d'après les essais que j'ai effectués jusqu'à présent, il attire indifféremment tous les corps placés à une distance suffisante de lui (mon morceau d'ambre le plus précieux attire non seulement le sable et les poudres minérales, mais aussi les limailles d'acier et de cuivre, et même l'or battu), à condition qu'ils soient suffisamment petits ou légers, à l'exception peut-être du feu.

Dans un autre passage, on trouve cette prise de conscience cruciale :^{28,29}

Nous avons découvert par expérience qu'un morceau d'ambre vigoureux et bien excité attire non seulement la poudre d'ambre, mais aussi des fragments moins fins. Et comme dans de nombreux cas, un contraire en attire un autre, cet essai en a suggéré un autre qui, en cas de succès, prouverait probablement que dans l'attraction électrique, non seulement des *effluves* sont émis par le corps électrique, mais que ces *effluves* se fixent sur le corps à attirer, et ce, de telle manière que les fils visqueux intermédiaires, que l'on peut supposer être constitués de ces *effluves* cohérents, se contractent ou se rétractent vers les deux extrémités lorsque leur agitation cesse, presque comme le fait une corde de luth fortement tendue lorsqu'on la laisse se rétracter pour prendre des dimensions plus courtes. Mais la conjecture elle-même était beaucoup plus facile à formuler que l'expérience

²⁸[Boy00, p. 516].

²⁹We have found by Experiment, That a vigorous and well excited piece of Amber will draw, not onely the powder of Amber, but less minute fragments of it. And as in many cases one contrary directs to another, so this Trial suggested a further, which, in case of good success, would probably argue, that in Electrical Attraction not onely *Effluvia* are emitted by the Electrical body, but these *Effluvia* fasten upon the body to be drawn, and that in such a way, that the intervening viscus strings, which may be supposed to be made up of those cohering *Effluvia*, are, when their agitation ceases, contracted or made to shrink inwards towards both ends, almost as a highly stretch'd Lute-string does when 'tis permitted to retreat into shorter dimensions. But the Conjecture itself was much more easie to be made than the Experiment requisite to examine it. For we found it no easie matter to suspend an Electric, great and vigorous enough, in such a manner, that it might, whilst suspended, be excited, and be so nicely poised, that so faint a force as that wherewith it attracts light bodies should be able to procure a Local Motion to the whole Body it self. But after some fruitless attempts with other Electricks, I had recourse to the very vigorous piece of polish'd Amber, formerly mention'd, and when we had with the help of a little Wax suspended it by a silken thread, we chased very well one of the blunt edges of it upon a kind of large Pin-cushion cover'd with a course and black woollen stuff, and then brought the Electric, as soon as we could, to settle notwithstanding its hanging freely at the bottom of the string. This course of rubbing on the edge of the Amber we pitch'd upon for more than one reason ; for if we had chafed the flat side, the Amber could not have approached the body it had been rub'd on without making a change of place in the whole Electric, and, which is worse, without making it move (contrary to the nature of heavy bodies) somewhat upwards ; whereas the Amber having, by reason of its suspension, in parts counterpoised by one another ; to make the excited edge approach to another body, that edge needed not at all ascend, but onely be moved horizontally, to which way of moving the gravity of the Electric (which the string kept from moving downwards) could be but little or no hinderance. And agreeably to this we found, that if, as soon as the suspended and well rubb'd electric was brought to settle freely, we applied to the chafed edge, but without touching it, the lately mention'd Cushion, which, by reason of its rough *Superficies* and porosity, was fit for the electrical *Effluvia* to fasten upon, the edge would manifestly be drawn aside by the Cushion steadily held, and if this were slowly removed, would follow it a good way ; and when this body no longer detain'd it, would return to the posture wherein it had settled before. And this power of approaching the Cushion by vertue of the operation of its own steams, was so durable in our vigorous piece of Amber, that by once chasing it, I was able to make it follow the Cushion no less than ten or eleven times.

nécessaire pour la vérifier. En effet, nous avons constaté qu'il n'était pas facile de suspendre un électrique suffisamment grand et puissant de manière à ce qu'il puisse, une fois suspendu, être excité et si bien équilibré qu'une force aussi faible que celle avec laquelle il attire les corps légers puisse provoquer un mouvement local de l'ensemble du corps lui-même. Mais après quelques tentatives infructueuses avec d'autres électriques, j'ai eu recours au morceau d'ambre poli très vigoureux mentionné précédemment, et lorsque nous l'avons suspendu à l'aide d'un peu de cire et d'un fil de soie, nous avons très bien poli l'un de ses bords émoussés sur une sorte de grande pelote à épingles recouverte d'une étoffe de laine noire et grossière, puis nous avons amené l'électrique, dès que possible, à se stabiliser malgré sa suspension libre au bout du fil. Nous avons choisi de frotter le bord de l'ambre pour plusieurs raisons; en effet, si nous avions frotté le côté plat, l'ambre n'aurait pas pu s'approcher du corps sur lequel il avait été frotté sans modifier la position de l'électrique dans son ensemble et, pire encore, sans le faire bouger (contrairement à la nature des corps lourds) quelque peu vers le haut; alors que l'ambre, en raison de sa suspension, avait des parties qui se contre-balançaient mutuellement; pour que le bord excité s'approche d'un autre corps, ce bord n'avait pas besoin de monter, mais seulement d'être déplacé horizontalement, ce à quoi la gravité de l'électrique (que le fil empêchait de descendre) ne pouvait être que peu ou pas du tout un obstacle. Et conformément à cela, nous avons constaté que si, dès que l'électrique suspendu et bien frotté était amené à se stabiliser librement, nous appliquions sur le bord frotté, mais sans le toucher, le coussin mentionné précédemment, qui, en raison de sa *surface* rugueuse et de sa porosité, était apte à retenir les *effluves* électriques, le bord était manifestement attiré par le coussin maintenu fermement, et si celui-ci était lentement retiré, il le suivait sur une bonne distance; et lorsque ce corps ne le retenait plus, il revenait à la position dans laquelle il s'était stabilisé auparavant. Et ce pouvoir d'approcher le coussin grâce à l'action de ses propres vapeurs était si durable dans notre morceau d'ambre vigoureux que, après l'avoir chassé une fois, j'ai pu le faire suivre le coussin pas moins de dix ou onze fois.

Les expériences de Fabri et Boyle ont montré que non seulement l'ambre frotté orientait et attirait les objets légers, mais aussi que l'ambre frotté et la cire à cacheter frottée étaient orientés et attirés par d'autres objets. Leurs expériences sont diamétralement opposées aux observations de Fracastoro, décrites dans la section 3.1. Fracastoro a suspendu de petits morceaux d'ambre et d'argent avec son perpendiculaire et a observé qu'ils étaient attirés par un autre morceau d'ambre frotté placé à proximité, comme le montre la figure 3.2. Fabri et Boyle, quant à eux, ont observé qu'un morceau d'ambre frotté suspendu à un fil était attiré et orienté par un autre objet placé à proximité, comme dans la figure 3.21.

Il s'agit d'une découverte physique très importante. Elle montre qu'il existe une action et une réaction en électrostatique. Autrement dit, il existe une interaction électrique mutuelle entre l'objet frotté et les objets proches. L'objet frotté exerce une force et un couple sur les objets neutres proches. Et ces objets exercent à leur tour une force et un couple opposés sur l'objet frotté.

En 1660 et 1675, Fabri et Boyle ont conclu expérimentalement qu'il existait une action et une réaction en électricité. Il ne s'agissait que de preuves qualitatives, comme

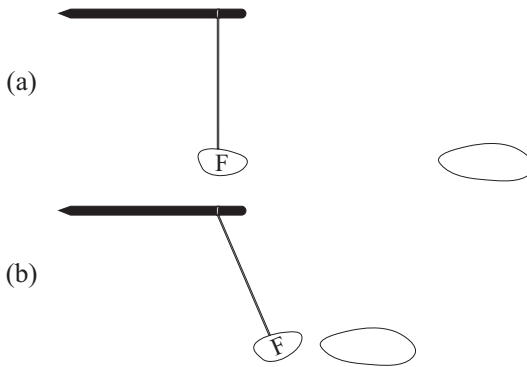


FIG. 3.21 : (a) Un morceau d'ambre frotté, représenté par F , pend verticalement lorsqu'il est éloigné de tout objet neutre. (b) Le morceau d'ambre frotté F est attiré par un corps neutre approché de lui.

les expériences décrites dans cette section. Ils n'ont pas mesuré la force exercée par l'ambre ni la force opposée exercée par les corps environnants.

3.7 Newton et l'électricité

Comme nous l'avons vu dans la section 3.6, entre 1660 et 1675, Fabri et Boyle ont découvert que les actions électriques sont réciproques. Quelques années plus tard, en 1687, Isaac Newton (1642–1727), figure 3.22, a inclus le principe d'action et de réaction comme l'un des piliers de l'ensemble de la physique.

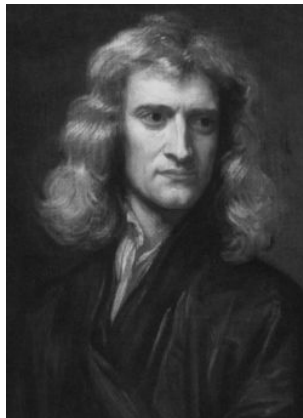


FIG. 3.22 : Isaac Newton (1642–1727). Il s'agit du portrait le plus célèbre de Newton. Il a été réalisé par Godfrey Kneller (1646–1723) en 1689. Newton y apparaît avec ses cheveux naturels, au sommet de sa carrière scientifique, deux ans après la publication des *Principia*.

Il s'agit du troisième axiome ou loi du mouvement qu'il a inclus dans son célèbre ouvrage, connu sous son nom latin, *Principia*. L'auteur a préparé la traduction en langue portugaise.³⁰ Nous utiliserons la traduction en langue française, par la Marquise du Chastellet, *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*.³¹ Le troisième axiome de Newton, ou troisième loi du mouvement, a été formulé comme suit :³²

L'action est toujours égale & opposée à la réaction ; c'est-à-dire, que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales, & dans des directions contraires.

Il est important de noter que Newton pensait que cet axiome devait être valable pour toutes les interactions connues : gravitationnelles, électriques, magnétiques, élastiques, forces de contact, frottements, collisions, etc. De plus, pour Newton, ce principe avait à la fois une signification qualitative et un aspect quantitatif très précis, à savoir que chaque action entraîne toujours une réaction d'intensité égale. De plus, elles sont alignées le long de la ligne droite reliant les deux corps, dirigées vers les parties correspondantes. Par action et réaction, Newton faisait référence aux forces mutuelles entre les deux corps, qui sont mesurées quantitativement par les variations de la quantité de mouvement linéaire de chaque corps par unité de temps. Ce que nous appelons quantité de mouvement linéaire, Newton l'appelait quantité de mouvement, car elle est proportionnelle à la masse du corps multipliée par sa vitesse par rapport à l'espace absolu. Ce travail fondamental de Newton marque une nouvelle époque dans la physique, une époque où la science a atteint un haut degré de précision.

Dans les *Principia*, Newton a présenté les collisions et les forces de contact comme des exemples d'interactions qui satisfont au principe d'action et de réaction. En ce qui concerne les actions à distance, il a cité les exemples de la gravitation et du magnétisme, discutant de ce dernier dans les termes suivants :³³

Je vais faire voir qu'elle l'est aussi dans les attractions.

Imaginez entre les deux corps *A* & *B* un obstacle quelconque qui les empêche de se joindre. Si un de ces corps comme *A* est plus attiré vers *B*, que *B* vers *A*, l'obstacle sera plus pressé par le corps *A* que par le corps *B* ; ainsi il ne sera point en équilibre. La plus forte pression prévaudra, & il arrivera que le système, composé de ces deux corps & de l'obstacle qui est entre deux, se mouvra en ligne droite vers *B*, & qu'il s'en ira à l'infini dans le vuide avec un mouvement continuellement accéléré, ce qui est absurde & contraire à la première loi du mouvement ; car par cette première loi, ce système doit persévérer dans son état de repos ou de mouvement en ligne droite ; ainsi ces deux corps doivent presser également cet obstacle, & être par conséquent tirés également l'un vers l'autre.

J'en ai fait l'expérience sur le fer & sur l'aimant. Si on pose l'aimant & le fer chacun séparément dans de petits vaisseaux sur une eau dormante, & que ces petits vaisseaux se touchent, ni l'un ni l'autre ne sera mû ; mais ils soutiendront par l'égalité de leur attraction les efforts mutuels qu'ils font l'un sur l'autre, & étant en équilibre, ils resteront en repos.

³⁰ [New90c], [New08] et [New10].

³¹ [New90a, New90b].

³² [New90a, p. 18].

³³ [New90a, p. 32].

Dans la question VIII de son *Optique*, il décrit des expériences sur l'électricité :³⁴

Question VIII. Les corps fixes, échauffés à certain degré, deviennent lumineux & brillants : cette émission de lumière n'est-elle pas produite par les vibrations de leurs parties ? Et les corps qui abondent en parties terreuses en parties sulfureuses sur-tout, ne jettent-ils pas de la lumière toutes les fois que ces parties sont suffisamment agitées, par la chaleur, par le frottement, par la percussion, par la putréfaction, par les mouvements vitaux, ou par quelque autre cause [...] ?

De même un globe de verre de 8 à 10 pouces [de 20 à 30 cm] de diamètre, tournant avec rapidité sur son axe, jette de la lumière aux endroits où il frotte contre la paume de la main. Qu'on lui présente alors un morceau de papier blanc ou le doigt, à quelques lignes de distance la matière électrique, excitée par le flottement, se portera au papier ou au doigt, avec tant de vitesse qu'elle les rendra aussi lumineux qu'un ver luisant. Quelquefois en s'élançant du verre, elle frappe assez vivement le doigt pour causer de la douleur. On produit des phénomènes semblables, en frottant avec du papier un gros & long cylindre de verre, jusqu'à ce qu'il soit chaud.

L'électricité est également mentionnée dans la question XXXI, où Newton souligne les interactions mutuelles à distance entre les corps :³⁵

Question XXXI. Les petites particules des corps n'ont-elles pas certaines propriétés, non seulement au moyen desquelles elles agissent, à certaine distance, sur les rayons de lumière pour les réfléchir, les rompre, & les infléchir ; mais au moyen desquelles ces particules agissent les unes sur les autres par des attractions de gravité, de magnétisme, d'électricité ? D'après ces exemples paroitra-t-il invraisemblable, qu'il y ait d'autres forces attractives dans la Nature, elle qui est toujours conforme à elle-même ? Je n'examine point ici quelle est la cause de ces attractions : ce que j'appelle attraction peut être produit par impulsion ou par d'autres moyens qui me sont inconnus. Je n'emploie ici ce terme que pour désigner une force, en vertu de laquelle les corps tendent réciproquement à s'approcher, quel qu'en soit le principe : car il importe d'apprendre à connoître les corps qui s'attirent mutuellement, & les lois suivant lesquelles ils s'attirent, avant de rechercher la cause de leur attraction. Les attractions de gravité, de magnétisme, d'électricité s'étendent à des distances fort sensibles ; aussi n'ont-elles pas échappé, même aux observateurs vulgaires : mais il peut y en avoir d'autres qui s'étendent à de si petites distances, qu'elles aient échappé jusqu'ici aux yeux les plus pénétrants ; peut-être l'attraction électrique s'étend-elle à d'aussi petites distances ; même sans être excitée par le frottement.

Il mentionne également les attractions électriques dans les *Principia*. Par exemple, dans le livre III :³⁶

Proposition VII. Théorème VII.

La gravité appartient à tous les corps, & elle est proportionnelle à la quantité de matière que chaque corps contient. [...]

³⁴[New77b, pp. 188–190] avec traduction portugaise dans [New96].

³⁵[New77b, pp. 238–239].

³⁶[New90b, pp. 21–22].

Cor. I. La gravité vers toute une planette, est donc composée de la gravité vers toutes ses parties. Nous en avons des exemples dans les attractions magnétiques & électriques. Car l'attraction vers le tout est composée des attractions vers chacune des parties.

Dans le Scholium général à la fin du livre, il mentionne également l'électricité, soulignant à nouveau les interactions mutuelles entre les corps :³⁷

Ce seroit ici le lieu d'ajouter quelque chose sur cette espèce d'esprit très subtil qui pénètre à travers tous les corps solides, & qui est caché dans leur substance ; c'est par la force, & l'action de cet esprit que les particules des corps s'attirent mutuellement aux plus petites distances, & qu'elles cohérent lorsqu'elles sont contigues ; c'est par lui que les corps électriques agissent à de plus grandes distances, tant pour attirer que pour repousser les corpuscules voisins : & c'est encore par le moyen de cet esprit que la lumière émane, se réfléchit, s'infléchit, se réfracte, & chauffe les corps ; toutes les sensations sont excitées, & les membres des animaux sont mûs, quand leur volonté l'ordonne, par les vibrations de cette substance spiritueuse qui se propage des organes extérieurs des sens, par les filets solides des nerfs, jusqu'au cerveau, & ensuite du cerveau dans les muscles. Mais ces choses ne peuvent s'expliquer en peu de mots ; & on n'a pas fait encore un nombre suffisant d'expériences pour pouvoir déterminer exactement les loix selon lesquelles agit cet esprit universel.

Ces citations montrent que, dans l'esprit de Newton, l'électricité jouait un rôle fondamental dans les phénomènes naturels.

³⁷ [New90b, pp. 179–180].

Chapitre 4

L'attraction et la répulsion électriques

4.1 Existe-t-il une répulsion électrique ?

Toutes les expériences décrites jusqu'à présent dans cet ouvrage ont porté sur l'attraction entre les corps. Mais les phénomènes électriques se caractérisent également par la répulsion.

Expérience 4.1

Une façon très simple d'observer la répulsion électrique consiste à utiliser une bande de sac en plastique. Découpez une bande de 2 cm de large et de 10 à 20 cm de long. Suspendez-la à un support horizontal (une brochette en bois, un crayon ou un doigt). Les deux moitiés de la bande neutre sont initialement suspendues verticalement, parallèlement l'une à l'autre, comme dans la figure 4.1 (a). Nous frottons ensuite les deux moitiés avec le même matériau (par exemple, en les passant entre nos doigts ou en les frottant sur un morceau de papier). Une fois relâchées, elles se repoussent, les deux moitiés s'éloignant latéralement, figure 4.1 (b).

Il est également possible d'observer cet effet avec deux morceaux de paille en plastique d'environ 5 cm de long chacun. Une extrémité de chaque paille est attachée à chaque extrémité d'un fil de soie ou de nylon de 10 ou 20 cm de long. Le fil est suspendu par son centre à un support horizontal de manière à ce que les deux pailles neutres restent initialement côte à côte à la verticale, leurs extrémités libres pointant vers le bas. Lorsque les deux pailles sont frottées avec le même matériau, elles commencent à se repousser l'une l'autre après avoir été relâchées, se déplaçant vers l'extérieur. Plus le support horizontal est fin, plus le phénomène sera visible.

Une troisième alternative utilise des ballons en caoutchouc gonflés. Deux ballons, soutenus par des fils, sont initialement suspendus de manière à se toucher. Lorsque les ballons sont frottés avec des cheveux, ils commencent à se repousser. Ils s'éloignent l'un de l'autre et ne se touchent plus.

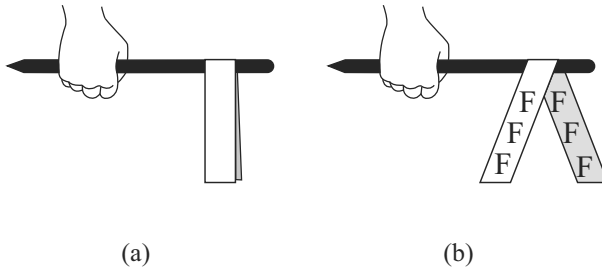


FIG. 4.1 : (a) Une bande de plastique neutre est suspendue verticalement à une brochette en bois horizontale. (b) Répulsion entre les deux moitiés d'une bande de plastique frottée.

Dans tous ces cas, nous observons la répulsion de corps faits du même matériau (deux bandes de plastique, deux pailles ou deux ballons en caoutchouc) qui ont été frottés avec la même substance. Il s'agit d'un phénomène nouveau qui n'avait pas été observé dans les expériences précédentes.

Expérience 4.2

En utilisant deux versoria en plastique, nous pouvons observer l'orientation électrique due à la répulsion. Nous frottons uniquement une patte de chaque versorium avec la même substance, par exemple une feuille de papier ou nos cheveux. Les deux versoria sont placés côte à côte, parallèlement l'un à l'autre, les pattes frottées pointant dans la même direction. Une fois relâchés, les pattes frottées se repoussent. En raison de cette répulsion, les versoria tournent par rapport à leur axe vertical de telle sorte qu'à la fin du processus, les pattes frottées restent alignées, mais à la plus grande distance possible l'une de l'autre, figure 4.2.

Cet effet est plus visible si les deux versoria sont initialement très proches l'un de l'autre. Afin d'éviter tout contact entre les deux pattes qui n'ont pas été frottées après la rotation des versoria, vous pouvez placer l'un des versoria légèrement plus haut que l'autre de manière à ce qu'après la répulsion, la patte d'un versorium se trouve au-dessus de la patte de l'autre.

Il convient également de noter que les versoria tournent dans des directions opposées après leur libération. Tandis que l'un tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, l'autre tourne dans le sens inverse. Cela signifie que le couple exercé par le versorium *A* sur le versorium *B* est opposé au couple exercé par le versorium *B* sur le versorium *A*.

Afin de se souvenir plus facilement de la patte qui a été frottée, on peut la marquer avec une goutte d'encre, un stylo ou une petite entaille.

Expérience 4.3

Une autre variante de l'expérience 4.2 consiste à frotter les deux pattes de chaque versorium. Ils sont ensuite placés en ligne droite, leurs pattes très proches l'une de

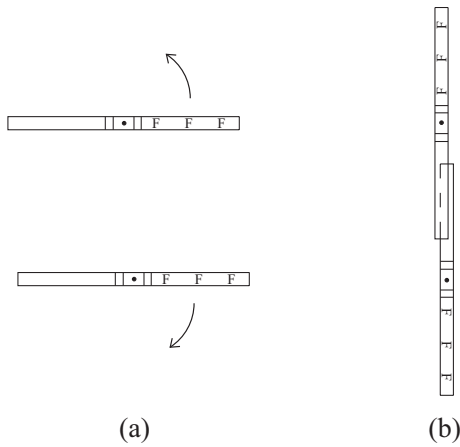


FIG. 4.2 : (a) Répulsion entre les pattes frottées de deux versoria en plastique, vus de dessus, placés côte à côte dans des directions parallèles. (b) Orientation d'équilibre finale des deux versoria.

l'autre, presque en contact. Une fois libérés, ils tournent dans des directions opposées. Lorsqu'ils s'arrêtent, ils sont parallèles l'un à l'autre, côte à côte, comme dans la figure 4.3.

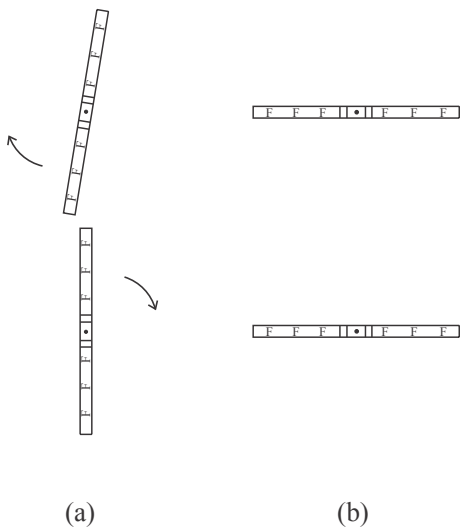


FIG. 4.3 : (a) Répulsion entre deux versoria en plastique, vus de dessus, qui ont été frottés sur toute leur longueur lorsqu'ils sont placés l'un près de l'autre et alignés dans la même direction. (b) Orientations finales d'équilibre des deux versoria.

4.2 L'expérience de Guericke avec une plume de duvet flottante

Expérience 4.4

Nous allons maintenant réaliser une nouvelle expérience, analogue à celle qui a eu une grande importance historique. Nous prenons d'abord un objet tel qu'une plume de duvet, une graine de pissenlit ou quelques brins de coton. Il est important que l'objet choisi mette beaucoup de temps 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.

Nous commençons par frotter une paille en plastique dans des cheveux. Afin de déterminer si la paille est bien chargée, nous pouvons utiliser le test du mur décrit dans l'expérience 3.6. La paille frottée est ensuite tenue horizontalement entre nos doigts à une extrémité. De l'autre main, nous lâchons la plume de duvet, la graine de pissenlit ou les brins de coton un peu au-dessus de la paille. L'objet est attiré par la paille et y adhère. Si nous regardons attentivement l'objet, nous pouvons voir ses fibres s'étirer, comme si elles voulaient s'éloigner de la paille. Cela se produit pour la même raison que les objets utilisés dans l'expérience 4.1 se repoussent mutuellement. 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, nous pouvons placer la paille frottée sous l'objet en chute. L'objet est alors repoussé par la paille et se déplace vers le haut. Parfois, cela ne se produit pas immédiatement, car l'objet doit toucher la paille frottée deux ou trois fois et se détacher 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. À partir de maintenant, nous supposons que l'objet flotte déjà dans l'air, repoussé par la paille frottée située en dessous, comme dans la figure 4.4.

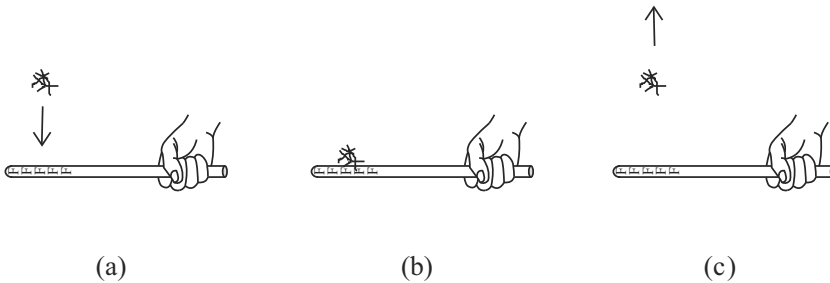


FIG. 4.4 : (a) Des brins de coton sont initialement attirés par une paille en plastique frottée. (b) Le coton touche la partie frottée de la paille. (c) Après le contact, le coton est repoussé par la paille. Il peut alors rester en suspension au-dessus de la paille malgré l'attraction gravitationnelle de la Terre!

La figure 4.5 illustre une expérience similaire réalisée avec une graine de pissenlit. La graine de pissenlit tombe naturellement très lentement, elle est donc adaptée à cette expérience. Il est facile de la maintenir en suspension au-dessus d'une paille en plastique frottée avec des cheveux.

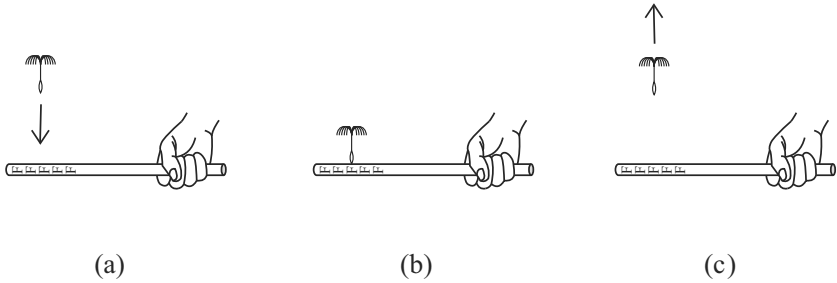


FIG. 4.5 : L'expérience 4.4 peut facilement être réalisée avec une graine de pissenlit flottant au-dessus d'une paille en plastique frottée avec des cheveux.

En déplaçant lentement la paille frottée sous l'objet, nous pouvons le déplacer à n'importe quel endroit dans une 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, nous utilisons 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 constamment déplacée sous celui-ci, en suivant son mouvement, afin de guider sa trajectoire. Avec une graine de pissenlit, la procédure est généralement plus facile. Lorsqu'elle est lâchée dans l'air au-dessus de la paille frottée, elle est attirée par la paille, la touche et en est immédiatement repoussée. Il s'agit d'une expérience très simple, mais extrêmement curieuse. Personne qui la réalise n'oublie ce qu'il ou elle voit.

Une expérience comme celle-ci a eu une importance historique considérable. Elle a été réalisée pour la première fois par Otto von Guericke (1602–1686), figure 4.6.¹

Il est apparu dans son livre sur « Les nouvelles expériences de Magdebourg », publié en 1672 en latin. Selon la préface de cet ouvrage, le livre avait en fait été achevé en 1663. À un moment donné de sa vie, Guericke a été maire de Magdebourg. Dans ce livre, il décrit la pompe à air qu'il a inventée en se basant sur la découverte de la capacité de pompage de l'air. En 1657, il l'utilisa pour réaliser à Magdebourg la désormais célèbre démonstration publique des forces énormes dues à la pression atmosphérique.² Il disposait d'une sphère creuse composée de deux hémisphères en cuivre qui se touchaient côte à côte. L'air à l'intérieur de la sphère fut retiré à l'aide de sa pompe. Une fois l'air retiré, deux groupes de huit chevaux tirant de chaque côté ont eu d'énormes difficultés à séparer les hémisphères. En revanche, lorsque l'air a pu

¹[Hei99, pp. 215–218].

²[Kra81].



FIG. 4.6 : Otto von Guericke (1602–1686).

entrer dans la sphère, les deux hémisphères ont pu être facilement séparés par une seule personne.

Mais ce qui nous intéresse ici, c'est une autre expérience réalisée par Guericke. Son illustration décrivant cette expérience est présentée dans la figure 4.7.



FIG. 4.7 : L'expérience de Guericke, dans laquelle il a maintenu une plume de duvet en suspension au-dessus d'un globe de soufre frotté, ainsi que sa machine électrique.

Nous citons son célèbre ouvrage, prenant comme source la version anglaise :^{3,4}

³[Gue94, Livre 4, chapitre 15, pp. 227–231].

⁴*The Experiment Wherein these Aforementioned Important Virtues can be Excited through Rubbing on a Sulphur Globe*

If one is so minded, he should take a glass sphere, a so-called phial, the size of a baby's head and pour in sulphur that has been powdered in a mortar. Then, by heating it, he should cause the powder to melt. After cooling it he should break the glass sphere, extract the ball which remains and store it away in a dry place of low humidity. [...]

Section 2. In order to demonstrate the conserving virtue present in this globe, one should set it up with a rod through its core on two supports, *ab*, on a stand labelled, *abcd*. This should be a palm's width in height

*Expérience permettant de stimuler les vertus importantes
susmentionnées en frottant un globe de soufre*

Si l'on souhaite réaliser cette expérience, il faut prendre une sphère de verre, appelée fiole, de la taille d'une tête de bébé, et y verser du soufre réduit en poudre dans un mortier. Ensuite, en la chauffant, il faut faire fondre la poudre. Après l'avoir refroidie, il doit casser la sphère de verre, extraire la boule qui reste et la conserver dans un endroit sec et peu humide. [...]

Section 2.

Afin de démontrer la vertu conservatrice présente dans ce globe, il faut le placer avec une tige traversant son centre sur deux supports, *ab*, sur un socle marqué *abcd*. Celui-ci doit être à une hauteur d'une paume de main à partir de la base et toutes sortes de lambeaux ou de morceaux de feuilles, d'or, d'argent, de papier, de houblon et d'autres particules minuscules doivent être dispersés en dessous. Il faut ensuite toucher la sphère avec une main sèche et la frotter ou la caresser deux ou trois fois, etc. À ce stade, elle attirera vers elle les fragments susmentionnés. Si le globe est tourné sur son axe, il emportera ces fragments avec lui. Nous pouvons maintenant percevoir visuellement comment la sphère de notre terre retient et maintient tous les animaux et autres corps à sa surface et les transporte avec elle dans son mouvement quotidien de vingt-quatre heures. [...]

Section 3.

On peut clairement démontrer la présence de la vertu expulsive dans ce globe lorsqu'il est retiré du support susmentionné et tenu dans la main, puis frotté ou caressé de la manière déjà décrite. Il attire alors non seulement les petits corps du type mentionné ci-dessus (en fonction des conditions météorologiques), mais les repousse également. Une fois qu'il a touché ces corps, il ne les attire plus jusqu'à ce qu'ils aient touché un autre corps. Cette vertu est particulièrement évidente dans son effet sur les plumes très douces et légères, *a*, (car elles tombent plus lentement sur Terre que d'autres morceaux et lambeaux). Ainsi, lorsque les plumes sont propulsées vers le haut et restent suspendues dans la sphère de vertu de ce globe, elles peuvent flotter pendant assez longtemps et être transportées dans toute la pièce avec le globe, où que l'on souhaite. [...]

from the base and all kinds of shreds or bits of leaves, gold, silver, paper, hop plants and other tiny particles should be strewn beneath it. Then one should touch the sphere with a dry hand and rub or stroke it two or three times etc. At this point it will attract the aforementioned fragments to it. If the globe is rotated on its axis, it will carry these bits along with it. Now we can visually perceive how the sphere of our earth holds and maintains all animals and other bodies on its surface and carries them about with it in its daily twenty-four hour motion. [...]

Section 3. One can clearly demonstrate the presence of the expulsive virtue in this globe when it is removed from the aforementioned stand and being held in the hand, is rubbed or stroked in the manner already described. Then it not only attracts, but also again repels from itself small bodies of the kind mentioned above (depending upon the prevailing weather). Once it has touched these bodies, it does not attract them again until they have subsequently touched some other body. This virtue can be seen particularly clearly in its effect upon very soft and light feathers, *a*, (because they fall to Earth more slowly than other bits and shreds). Thus when the feathers are propelled upwards and hang in the sphere of virtue of this globe, they can float for quite a long time and be carried around the whole room with the globe wherever one wishes. [...]

L'expérience 4.4 est analogue à celle de Guericke, mais utilise une paille en plastique à la place d'un globe de soufre. Cependant, il faut souligner que Guericke lui-même ne considérait pas la répulsion de la plume ou, comme il le disait, la « vertu explosive » du globe, comme un phénomène intrinsèquement électrique. Pour Guericke, cette propriété du globe de soufre était analogue à la force répulsive exercée par la Terre dans certaines circonstances. En conséquence, on estime aujourd'hui que Guericke n'a ni découvert ni reconnu une véritable répulsion électrique.

L'appareil de Guericke est considéré par certains auteurs comme la première machine électrique, c'est-à-dire le premier équipement permettant d'électriser des objets. Mais Guericke lui-même n'aurait probablement pas été d'accord avec cette affirmation. Pour Guericke, la boule de soufre était un simulacre de la Terre. Les différentes « vertus » manifestées par la boule, attractives et répulsives, simulaient les vertus analogues de notre planète. Par conséquent, pour Guericke, ces vertus n'étaient pas véritablement électriques. Une analyse détaillée de ce sujet se trouve dans les travaux de Roller et Roller, de Krafft et de Heilbron.⁵

Le premier instrument construit intentionnellement pour produire l'électrisation des corps est dû à Francis Hauksbee (environ 1666–1713), figure 4.8.⁶ La manivelle et la poulie font tourner la petite roue, qui fait tourner le globe de verre. Hauksbee frottait la surface externe du globe en rotation avec une feuille de papier ou avec ses mains nues. Un instrument comme celui-ci est appelé une « machine électrique », une « machine électrostatique », un « générateur triboélectrique » ou un « générateur électrique à friction ».

Des expériences analogues à celles de Guericke ont été menées par Gray et Hauksbee en 1708. Dans les expériences de Gray et Hauksbee, la plume était attirée puis repoussée par un verre flint frotté, qui est un type spécial de verre contenant du plomb dans sa composition.⁷ Nous verrons plus tard comment cette expérience a joué un rôle crucial dans une grande découverte faite par Du Fay. L'article de Gray de 1708 n'a été publié qu'en 1954.⁸ Gray ne cite pas le livre de Guericke, mais il est possible qu'il ait connu ses travaux, bien que cela ne soit pas certain. Hauksbee a vu l'article original de Gray et a contribué à empêcher sa publication.⁹ Hauksbee a publié des expériences analogues avec des plumes flottantes sans mentionner le nom de Gray.

Dans son article de 1708, Gray décrit douze expériences réalisées à l'aide d'un tube en verre de 70 à 80 cm de long et de 2 à 3 cm de diamètre. Il a frotté le tube à mains

⁵[RR57, pp. 565–568], [Kra81], et [Hei99, pp. 215–216].

⁶[Hau09, Plate VII], [RR57, pp. 565–568], [Hom67], [Hom81, pp. xiv–xv, 14, 42, 77 et 78n], [Que], [Hei81d] et [Hei99, pp. 230–234].

⁷[Chi54], [Hau08], [RR57, pp. 570 et 584–585], [Hom81, p. 13], et [Hei99, pp. 235–236].

⁸[Chi54].

⁹[Hei81c] et [Hei99, p. 236].

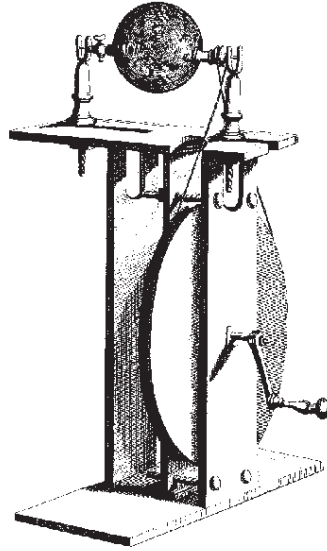


FIG. 4.8 : La machine électrique de Hauksbee.

nues. Nous ne citons ici que les quatre premières expériences :^{10,11,12,13}

Exp. 1 : Une plume de duvet lâchée des doigts est venue se poser sur le [tube] de verre [frotté] à une distance de plus de 30 pouces [76 cm]. Certaines des fibres les plus petites ont réagi au mouvement de la main alors que le verre était frotté à une distance de plus de 50 pouces [1,3 m]. [Une illustration de cette expérience figure dans les figures 4.9 et 4.10.]

¹⁰[Chi54, pp. 34–35].

¹¹Exper. 1st A down feather being let goe from the fingers came to the [rubbed] Glass [tube] at the distance of more than 30 inches [76 cm] some of the smallest fibres answerd to the motion of then hand whilst the Glass was Rubing at the Distance of more than 50 inches [1.3 m].

¹²Exp. 2^d if when the feather is come to the Glass it be held at about 6 or 8 inches [15 or 20 cm] Distance from the side of a wall edge of a Table Arme of a Chair or the like it will be drawn to it and thence to the Glass again and that for 10 or 15 times together without ceasing it flies to object at a greater Distance but then does not soe often Return.

¹³Exp. 3^d when the feather is on the Glass and half of its fibres are extended towards it the other from it diverging in two cones that Remotest from the Glass is much more obtuse than the other if when the feather is in this posture you Pinch its fibres between your thumbe and finger they will draw back soe soon as let goe and Imediatly cleave to the Glass and as if they had Retained some sence of the Injurie offered them will hardly be Allured to salute your fingers again but this is not ollwais alike Precented.

Exp. 4th When the feather is come to the Glass and thence Reflected if you follow it with the Glass twill flee from it and will by noe means be made to touch it till driven near to the next wall in the Room or some other solid object by which twill be attracted and freely return to the glass again Repeating its Reflections as in the second experiment soe I have sometimes caried the feather round the Room at the Distance of 5 or 6 inches [13 or 15 cm] without touching it and could move it upwards downwards inclineing or Horizontally in a line or Circle according to the motion of the Glass and if when the feather was floating in the air I Rubed the Glass the feather would Remove farther from it yet would respond to the motion of my hand by a vibrating motion not to be accounted for by that of the air.

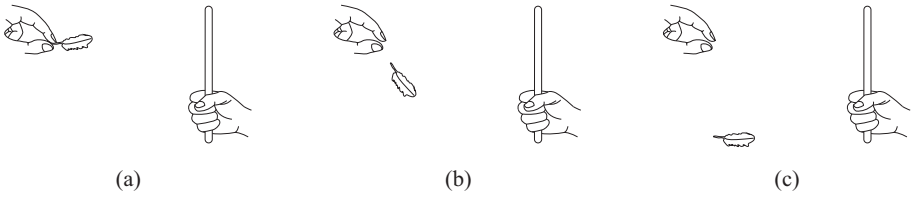


FIG. 4.9 : Une plume est lâchée près d'un tube en verre non frotté. Elle tombe au sol.

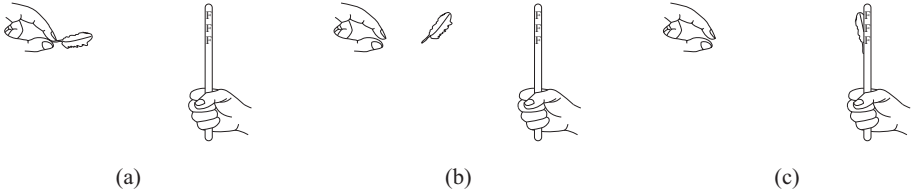


FIG. 4.10 : L'expérience de Gray montrant une plume attirée par un verre frotté.

Exp. 2 : si, lorsque la plume arrive au verre, elle est maintenue à environ 6 ou 8 pouces [15 ou 20 cm] de distance du bord d'un mur, d'une table, d'un accoudoir de chaise ou autre, elle sera attirée vers celui-ci, puis vers le verre, et ce, environ 10 ou 15 fois de suite sans s'arrêter, elle volera vers un objet situé à une plus grande distance, mais ne reviendra pas aussi souvent. [Une illustration de cette expérience figure à la figure 4.11.]

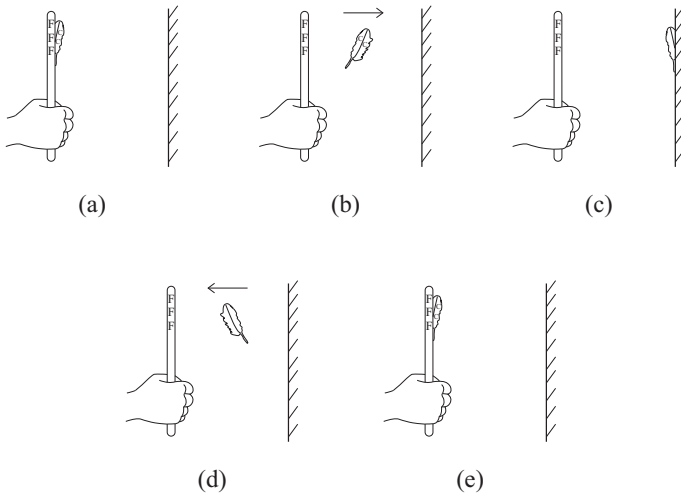


FIG. 4.11 : L'expérience de Gray montrant une plume oscillant entre un verre frotté et un mur.

Exp. 3 : lorsque la plume est posée sur le verre et que la moitié de ses fibres sont tendues vers celui-ci, l'autre moitié divergeant en deux cônes, celui qui est le plus éloigné du verre étant beaucoup plus obtus que l'autre. Si, lorsque la plume est dans cette position, vous pincez ses fibres entre votre pouce et votre index, elles se rétracteront dès que vous les relâcherez et se colleront immédiatement au verre, comme si elles avaient conservé une certaine sensation de la blessure qui leur a été infligée, elles ne seront guère enclines à saluer à nouveau vos doigts, mais cela ne se produit pas toujours de la même manière.

Exp. 4 : Lorsque la plume arrive au verre et s'y reflète, si vous la suivez avec le verre, elle s'en éloignera et ne le touchera en aucun cas, jusqu'à ce qu'elle soit poussée près du mur le plus proche de la pièce ou d'un autre objet solide par lequel elle sera attirée et reviendra librement vers le verre, répétant ses reflets comme dans la deuxième expérience. J'ai donc parfois transporté la plume dans la pièce à une distance de 5 ou 6 pouces [13 ou 15 cm] sans la toucher et je pouvais la déplacer vers le haut, vers le bas, en l'inclinant ou horizontalement en ligne droite ou en cercle selon le mouvement du verre. Si, lorsque la plume flottait dans l'air, je frottai le verre, la plume s'en éloignait encore plus, mais réagissait au mouvement de ma main par un mouvement vibrant qui ne pouvait s'expliquer par celui de l'air.

4.3 Du Fay reconnaît la répulsion électrique comme un phénomène réel

Les expériences décrites dans ces sections apportent quelque chose de nouveau et d'extrêmement important. Jusqu'à présent, nous n'avons observé que l'attraction ou l'absence d'attraction entre un corps frotté et les substances légères environnantes. Nous avons maintenant constaté qu'il existe également une « répulsion » électrique.

Bien que la répulsion électrique ait été observée à quelques reprises par certains chercheurs, elle était généralement interprétée comme un effet secondaire. Parfois, ce phénomène était interprété comme une simple répulsion « apparente ». Nous présentons ici quelques explications alternatives. (a) Certaines personnes pensaient que ce comportement était dû à un flux d'air qui éloignait les substances légères du corps frotté. (b) Une autre interprétation était que cette répulsion « apparente » était en fait une attraction exercée par d'autres corps environnants sur la substance légère. Selon cette interprétation, ce n'était pas l'ambre frotté qui commençait à repousser la substance légère, mais la substance légère était en fait attirée par d'autres corps environnants qui avaient acquis d'une manière ou d'une autre une certaine électricité. Si tel était le cas, la substance légère pouvait s'éloigner de l'ambre frotté si elle subissait une attraction plus faible de la part de l'ambre que de la part des corps environnants. (c) Une autre interprétation parfois donnée pour expliquer la répulsion observée était qu'elle s'apparentait à une collision. En d'autres termes, le corps était d'abord attiré par l'ambre frotté, entrainé en collision avec lui, puis rebondissait à une certaine distance. Ce rebond était interprété de manière mécanique, et non comme une véritable répulsion électrique.

Ce n'est qu'avec la publication des travaux de Charles François de Cisternay Du Fay en 1733 et 1734 que la répulsion a été reconnue comme un phénomène légitime

et caractéristique des interactions électriques.¹⁴ Il existe une belle biographie de Du Fay, figure 4.12, écrite par Heilbron.¹⁵ À la suite des travaux initiaux de Gray, Du Fay réussit à publier des articles remarquables contenant des découvertes fondamentales sur l'électricité.¹⁶



FIG. 4.12 : Du Fay (1698–1739).

Nous citons ici les propos de Du Fay décrivant comment il est parvenu à la conclusion que la répulsion électrique était un phénomène réel (c'est nous qui soulignons en italique).¹⁷ Il est intéressant de noter que Du Fay lui-même ne considérait pas initialement la répulsion comme un phénomène réel, mais qu'il a ensuite changé d'avis en raison des preuves expérimentales :

De l'Attraction & Répulsion des Corps Électriques.

Nous avons toujours considéré jusqu'à présent la vertu électrique en général, & sous ce mot on a entendu non seulement la vertu qu'ont les corps électriques d'attirer, mais aussi celle de repousser les corps qu'ils ont attirés. Cette répulsion n'est pas toujours constante, & elle est sujette à des variétés qui m'ont engagé à l'examiner avec soin, & je crois avoir découvert quelques principes très-simples qu'on n'avoit point encore soupçonnés, & qui rendent raison de toutes ces variétés, ensorte que je ne connois jusqu'à présent aucune expérience qui ne s'y accorde très-naturellement.

J'avois observé que les corps légers n'étoient ordinairement repoussés par le tube que lorsque l'on en approchoit quelque corps d'un volume un peu considérable, & cela me faisoit penser que ces derniers corps étoient rendus électriques par l'approche du tube, & qu'alors ils attiroient à leur tour le duvet, ou la feuille d'or, & qu'ainsi il étoit toujours attiré, soit par le tube, soit par les corps voisins, mais qu'il n'y avoit jamais de répulsion réelle.

¹⁴[Hei99, pp. 5 et 255–258].

¹⁵[Hei81b].

¹⁶[DF33a], [DF33c], [DF33d], [DF33b], [DF34a], [DF34b], [DF34c], [DF37b] et [DF37a].

¹⁷[DF33b, pp. 457–458].

Une expérience que M. de Reaumur m'indiqua, s'opposoit à cette explication; elle consiste à poser au bord d'une carte un petit monceau de poudre à mettre sur l'écriture, on approche de ce monceau un bâton de cire d'Espagne rendu électrique, & on voit très-clairement qu'il chasse au de-là de la carte des particules de poudre, sans qu'on puisse soupçonner qu'elles soient attirées par aucun corps voisin.

Une autre expérience aussi simple, & encore plus sensible, *acheva de me prouver que ma conjecture étoit fausse*. Si l'on met des feuilles d'or sur une glace, & que l'on approche le tube par dessous, les feuilles sont chassées en haut sans retomber sur la glace, & on ne peut certainement expliquer ce mouvement par l'attraction d'aucun corps voisin. La même chose arrive à travers la gaze de couleur, & les autres corps qui laissent passer les écoulements électriques, en sorte qu'on ne peut pas douter qu'il n'y ait une répulsion réelle dans l'action des corps électriques.

4.4 Le pendule électrique

Pour détecter plus clairement d'autres phénomènes électriques, nous avons besoin d'instruments spécifiques. Nous allons maintenant construire un « pendule électrique », également appelé « pendule électrostatique ». La procédure la plus simple consiste à attacher un fil de soie à un support horizontal, comme une paille en plastique. Vous pouvez également utiliser un fil synthétique fin en polyamide, comme du nylon, ou un fil en polyester. *Il est important que ce fil ne soit pas en coton ou en lin, comme un fil à coudre*. Nous attachons un morceau de papier ou de feuille d'aluminium à l'extrémité libre inférieure du fil. Ce morceau de papier peut être un disque, un carré, un triangle, etc., d'un diamètre ou d'une longueur maximale de l'ordre de 1 ou 2 cm. Pour l'instant, sa forme n'a pas d'importance. Le morceau de papier ne doit pas être froissé ni fixé avec du ruban adhésif. Le ruban adhésif peut empêcher l'observation de certains phénomènes qui seront décrits ici. Il est préférable de percer un trou dans le morceau de papier à l'aide d'une épingle, puis d'y fixer le fil, figure 4.13. En général, la feuille d'aluminium fonctionne mieux que le papier normal. Dans la section 6.5, nous présenterons les composants fondamentaux d'un pendule électrique comme celui-ci, après son utilisation pour réaliser plusieurs expériences.

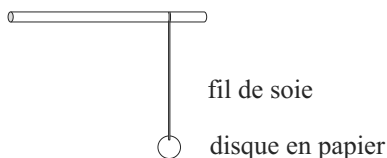


FIG. 4.13 : Une méthode simple pour fabriquer un pendule électrique.

Une autre méthode pratique consiste à utiliser des pailles en plastique fixes. Nous commençons par fabriquer un support pour l'ensemble du système. Il peut s'agir d'un morceau de pâte à modeler dans lequel nous enfonçons un clou ou une attache-papier, qui sera placé à l'intérieur de la paille afin de la maintenir en position verticale. Il convient donc de choisir un clou dont l'épaisseur et la longueur sont adaptées.

Un support très pratique peut être fabriqué à partir de gobelets en plastique fins. Nous faisons un petit trou au fond du gobelet et y enfonçons les deux pattes d'une attache-papier. Le gobelet est placé avec son ouverture vers le haut. Nous la remplissons de pâte de plâtre humide ou de ciment blanc humide. Elle sèche dans cette position. Elle sera utilisée avec l'ouverture du gobelet vers le bas et l'attache-papier vers le haut, figure 4.14. Comme ce type de support sera également utilisé dans d'autres instruments électriques, il est utile d'en préparer plusieurs à la fois. Certaines expériences peuvent nécessiter jusqu'à 10 bases de support.

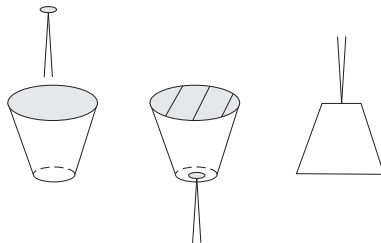


FIG. 4.14 : Support pour le pendule électrique composé d'un gobelet en plastique fin, d'une attache-papier et d'une pâte à modeler à base de plâtre.

Après cette procédure, nous plaçons une paille à boire en forme de lettre *L* inversée sur le support. Une autre alternative consiste à utiliser deux pailles, l'une placée verticalement sur le support et l'autre horizontalement. La deuxième paille est fixée à la première à l'aide d'une deuxième attache-papier. Les pattes de cette deuxième attache-papier forment un angle de 90°, l'une étant verticale et l'autre horizontale.

À l'extrémité libre de la paille horizontale, nous attachons le fil de soie avec le disque en papier fixé à son extrémité inférieure. Le pendule électrique est alors terminé, figure 4.15.

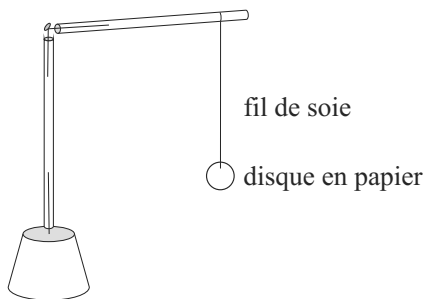


FIG. 4.15 : Pendule électrique avec support.

Expérience 4.5

Nous montons un pendule électrique avec un disque en papier à son extrémité. Nous attendons que le pendule soit au repos, avec le fil de soie et le disque en papier

suspendus verticalement vers le bas. Nous prenons maintenant une paille en plastique neutre, c'est-à-dire une paille qui n'attire pas les petits morceaux de papier légers sur une table, comme dans l'expérience 2.1, figure 2.1. Nous approchons cette paille en plastique neutre du disque en papier du pendule électrique. Rien ne se passe. Le pendule reste immobile dans le sens vertical.

Nous frottons une autre paille dans des cheveux ou avec une feuille ou un mouchoir en papier. Nous approchons lentement la paille frottée du pendule. Nous observons que le disque de papier commence à se déplacer vers la partie frottée de la paille. Pour l'instant, nous ne les mettrons pas en contact. Dans cette situation, le fil de soie du pendule reste incliné par rapport à la verticale, avec le disque de papier près de la partie frottée de la paille en plastique, figure 4.16.

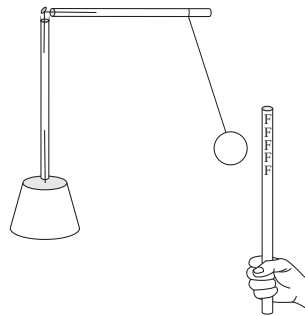


FIG. 4.16 : Un plastique frotté attirant le disque en papier d'un pendule électrique situé à proximité.

Cette expérience est analogue à l'expérience 2.1, qui montre une attraction entre la paille frottée et le pendule. Nous avons maintenant un troisième critère pour dire qu'un corps est « électriquement neutre ». Le premier critère a été présenté dans l'expérience 2.1, à savoir que le corps ne doit pas attirer les corps légers vers le haut. Le deuxième critère était celui de l'expérience 3.1 : le corps ne doit pas orienter un versorium métallique. Le troisième critère est celui illustré ici : il ne modifie pas l'angle vertical du fil d'un pendule électrique situé à proximité. Un « corps chargé », en revanche, attire les corps légers vers le haut, oriente les versoria et modifie l'angle du fil d'un pendule électrique.

Expérience 4.6

Nous pouvons faire en sorte que le disque en papier suive le mouvement du plastique frotté en déplaçant lentement le plastique d'avant en arrière devant le pendule. Pour l'instant, ils ne doivent pas être trop proches l'un de l'autre, afin d'éviter tout contact. Dans ce cas, lorsque le plastique se déplace vers le pendule, le disque en papier s'approche du plastique, et lorsque le plastique s'éloigne du pendule, le disque en papier revient à sa position verticale initiale, figure 4.17.

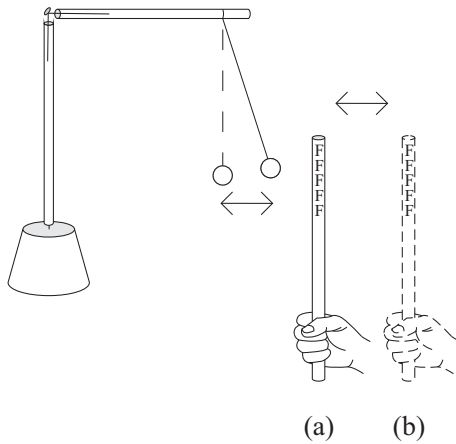


FIG. 4.17 : Un pendule électrique suivant le mouvement d'un morceau de plastique frotté. (a) Lorsque la paille est approchée du disque en papier, le papier se déplace vers elle. (b) Lorsque la paille est éloignée, le pendule revient à la position verticale.

Expérience 4.7

Nous répétons l'expérience 4.5. Mais cette fois-ci, nous rapprochons le plastique frotté du disque en papier, afin qu'ils entrent en contact. Nous observons que le pendule est d'abord attiré, puis rapidement repoussé par le plastique frotté ! Entre l'attraction et la répulsion, quelque chose de crucial se produit : le « contact » entre le disque de papier et le plastique frotté. Après ce contact, le papier s'envole du plastique frotté chaque fois que nous essayons de les rapprocher, figure 4.18.

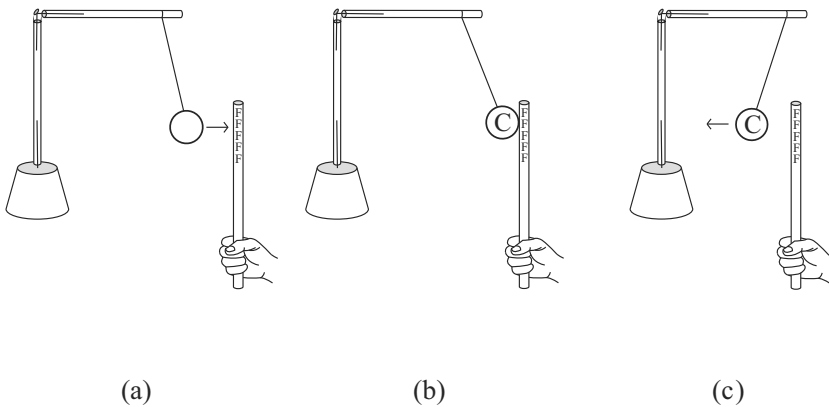


FIG. 4.18 : (a) Le disque en papier est d'abord attiré par le plastique frotté, (b) le touche, puis (c) est repoussé par la paille.

Parfois, le disque en papier n'est pas immédiatement repoussé par le plastique

frotté après le contact, restant en contact avec celui-ci pendant quelques secondes. Dans ces cas, nous pouvons observer la répulsion en tapotant la paille pour libérer le disque. Nous pouvons également déplacer la paille de haut en bas pour libérer le papier, ou souffler légèrement dessus. Après avoir été libéré, il 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.

Cette répulsion après contact avec un corps frotté a pu se produire pour certains objets dans les expériences 2.1, 2.3 et 2.4. Mais dans ces expériences, les objets légers, lorsqu'ils n'étaient plus en contact avec le plastique frotté, tombaient au sol en raison de l'attraction gravitationnelle de la Terre. Et il n'est pas facile de distinguer cette attraction par la Terre d'une éventuelle répulsion exercée sur eux par le plastique frotté qui était placé au-dessus d'eux. L'avantage du pendule électrique est que le fil de soie équilibre l'attraction gravitationnelle exercée par la Terre sur le disque de papier. Lorsque le disque est repoussé par la paille frottée après le contact, il ne tombe pas au sol, car il est soutenu par le fil de soie. Il est alors facile de voir la répulsion entre le plastique frotté et le disque de papier après leur contact.

Quoi qu'il en soit, en refaisant les expériences 2.1, 2.3 et 2.4, nous pouvons percevoir la répulsion électrique après le contact agissant conjointement avec l'attraction gravitationnelle, à condition d'analyser attentivement tous les détails de ces expériences.

Expérience 4.8

Nous répétons maintenant l'expérience 4.7. Au départ, le pendule est attiré par le plastique frotté, le touche, puis commence à être repoussé après avoir été relâché. Nous retirons ensuite le plastique frotté et le disque revient en position verticale. Nous approchons maintenant une brochette en bois neutre (ou une feuille de papier, ou notre doigt) près du disque en papier. Ce mouvement d'approche doit être très lent, afin d'éviter tout contact. On observe que le fil s'incline vers la brochette, ce qui indique que le disque en papier est attiré par la brochette, figure 4.19.

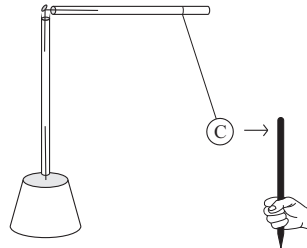


FIG. 4.19 : Le pendule électrique qui était repoussé par une paille frottée après que les deux aient été mis en contact, est maintenant attiré par une brochette en bois neutre.

Comme nous l'avons vu dans la section 3.5, cette attraction indique que le pendule s'est chargé électriquement dans l'expérience 4.7. Nous avons utilisé la lettre F

lorsqu'un plastique neutre s'est électrisé « par friction ». Nous observons maintenant qu'un disque en papier se charge « par simple contact » avec un morceau de plastique frotté. Ce processus de charge sera indiqué par la lettre *C*. C'est la signification de la lettre apparaissant dans les figures 4.18 et 4.19.

Définitions : Nous disons que dans l'expérience 4.7, le disque en papier du pendule « a acquis une charge électrique due au contact avec un autre corps chargé », est devenu « chargé par contact » ou « électrisé par contact ». Ce processus est appelé « charge par contact », « transfert de charge par contact » ou « électrisation par contact ».

Au lieu du mot « contact », on utilise parfois un terme plus général. Par exemple, « électrisation par communication » ou « électrisation par transfert de charges ». Il y a une raison à cela. Le contact physique entre le plastique frotté et le disque en papier n'est pas toujours nécessaire pour électriser le disque en papier. Il arrive parfois qu'une décharge électrique (c'est-à-dire une étincelle) se produise dans l'air lorsque le plastique frotté et le disque de papier sont très proches l'un de l'autre. Lorsque cela se produit, il y a un transfert de charge entre le plastique frotté et le disque de papier. Dans ce cas, le disque de papier, initialement déchargé, acquiert une charge électrique et commence à être repoussé par le plastique frotté. Dans cet ouvrage, nous ne traiterons pas de ces phénomènes de décharges électriques dans l'air.

4.5 Décharge par mise à terre

Expérience 4.9

Afin de répéter l'expérience 4.8 avec le même pendule, nous devons d'abord toucher le disque en papier avec notre doigt. Il n'est pas nécessaire de tenir le disque en papier ; un simple contact suffit. Ensuite, lorsque nous approchons un autre doigt (ou une feuille de papier, ou une brochette en bois) du disque en papier, nous observons que celui-ci ne bouge pas, car le fil reste vertical. Le disque de papier n'est plus attiré par la brochette, le doigt ou la feuille de papier neutres, comme c'était le cas dans l'expérience 4.8. Voir la figure 4.20.

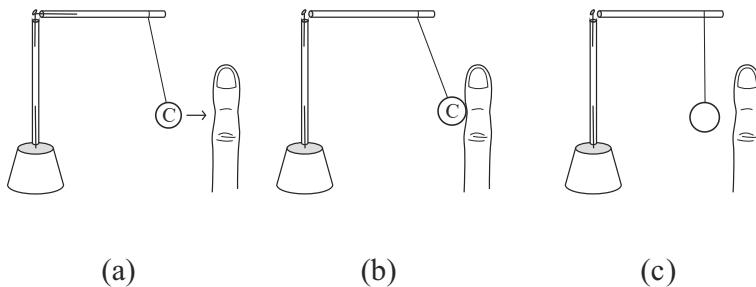


FIG. 4.20 : (a) Un pendule chargé électriquement est attiré par un doigt. (b) S'ils se touchent, le pendule se décharge. (c) Une fois déchargé, le pendule n'est plus attiré par un doigt proche.

Définitions : On dit que le disque en papier « 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 », « décharge par mise à la terre » ou « décharge par mise à la masse ». Il est également appelé « mise à la terre électrique », « mise à la masse électrique », « mise à la terre » ou « mise 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.

Après la décharge, lorsque nous approchons un plastique frotté du pendule, celui-ci n'est plus repoussé, comme c'était le cas à la fin de l'expérience 4.7. Ce que l'on observe maintenant est le même comportement qu'au début de l'expérience 4.7. Autrement dit, le pendule est d'abord attiré par le plastique frotté, le touche, puis n'est repoussé par celui-ci qu'ensuite.

Chaque fois que nous touchons le disque en papier avec notre doigt, nous pouvons répéter toute la procédure. Autrement dit, le pendule revient à son état neutre initial.

Appelons le plastique frotté des expériences 4.7 et 4.9 corps *A*. Le disque en papier sera appelé corps *B*. Et la main qui touche le disque sera appelée corps *C*. C'est en 1729 que Gray a découvert qu'un corps *B*, électrisé par contact avec une substance frottée *A*, se décharge par contact avec la main *C*. L'une de ses descriptions de l'effet de mise à la terre apparaît dans son ouvrage de 1731. Il a chargé un long tube de verre par friction. Le tube a été utilisé pour électriser un autre corps par contact. Nous citons ici quelques-uns de ses propos (nos commentaires en crochets) :^{18,19}

[...] car plusieurs expériences montrent que si un autre corps [*C*] *touche* ce corps [*B* électrisé par contact avec un corps *A*] qui attire, son attraction cesse jusqu'à ce que ce corps [*C*, qui a touché le corps électrisé *B*] soit retiré, et que l'autre [corps *B*, qui était initialement électrisé et qui a été déchargé par contact avec le corps *C*] soit à nouveau excité par le tube [*A* en verre frotté].

En 1733, Du Fay commença à utiliser cette procédure de manière systématique. Il frotta un tube en verre et l'utilisa pour électriser une boule en bois :²⁰

J'avois de plus le soin de toucher la boule avec la main après chaque station qu'on avoit faite avec le tube, afin de lui ôter toute la vertu qu'elle auroit pû avoir conservée par l'approche du tube ; cela la dépouille en effet de toute son électricité, ainsi que l'a remarqué M. Gray ; [...]

Expérience 4.10

Nous allons maintenant réaliser ces expériences de manière plus détaillée afin d'observer tous les effets. Dans un premier temps, nous approchons notre doigt du disque en papier non chargé d'un pendule électrique. Le disque ne bouge pas. Nous

¹⁸[Gra31a, p. 35].

¹⁹[...] for from several Experiments it appears, that if any other body [*C*] *touches* that [body *B* electrified by contact with a body *A*] which attracts, its Attraction ceases till that Body [*C*, which touched the electrified body *B*] be removed, and the other [body *B*, which was initially electrified and which was discharged by contact with body *C*] be again excited by the [rubbed glass] Tube [*A*].

²⁰[DF33d, p. 247].

frottons une paille et l’approchons du disque. Le disque est attiré, touche la paille et commence à être repoussé par celle-ci, comme le montre la figure 4.18. Nous retirons la paille et le fil du pendule revient à la verticale.

À ce moment, nous approchons lentement le doigt du disque, sans le toucher. Le disque est attiré par le doigt et se déplace vers lui.

Si le disque touche le doigt, le pendule revient immédiatement à la position verticale. Lorsque nous rapprochons à nouveau le doigt du disque, celui-ci ne bouge pas, car il n’est plus attiré par le doigt. Le pendule est revenu à sa position initiale.

Nous pouvons frotter la paille une fois de plus et recommencer toute cette série d’expériences.

4.6 Le pendule électrique de Gray

La plus ancienne description connue d’un pendule électrique a été donnée par Gray en 1720. Il a réalisé une expérience analogue à l’expérience 4.5, mais en utilisant une plume au lieu d’un disque en papier :^{21,22}

Une plume de duvet était attachée à l’extrémité d’un fin fil de soie brute, et l’autre extrémité à un petit bâton, qui était fixé à un pied, afin qu’il puisse tenir debout sur la table : on prenait un morceau de papier brun, qui, selon la méthode mentionnée ci-dessus [c’est-à-dire que le papier était d’abord chauffé au feu, puis frotté entre les doigts], était rendu fortement électrique ; lorsqu’on le tenait près de la plume, celle-ci venait vers le papier, et je la transportais avec celui-ci jusqu’à ce qu’elle arrive près de la perpendiculaire du bâton ; puis, en levant la main jusqu’à ce que le papier se trouve au-delà de la plume, le fil s’est tendu et s’est tenu debout dans l’air, comme s’il s’agissait d’un morceau de fil de fer, bien que la plume fût éloignée du papier d’environ un pouce [2,5 cm].

Nous illustrons cette expérience dans la figure 4.21.

4.7 Le versorium de Du Fay

Une autre manière intéressante d’observer la répulsion électrique repose sur un versorium créé par Du Fay.²³ Dans son cas, il s’agissait d’un versorium en verre muni d’une sphère métallique creuse à l’extrémité d’une de ses pattes. Ici, nous utilisons un versorium en plastique analogue, tel que décrit dans la section 3.1, c’est-à-dire une bande en plastique en forme de chapeau, dont les deux pattes sont légèrement inclinées vers le bas. Une épingle est fixée au centre du plastique, sa pointe vers le bas, et

²¹[Gra20, p. 107].

²²A Down Feather being tied to the end of a fine thread of Raw Silk, and the other end to a small Stick, which was fixed to a Foot, that it might stand upright on the Table : there was taken a piece of brown Paper, which by the above-mentioned method [that is, the paper was initially warmed by the fire and then rubbed by passing it between his fingers] was made to be strongly Electrical, which being held near the Feather, it came to the Paper, and I carried it with the same till it came near the Perpendicular of the Stick ; then lifting up my Hand till the Paper was got beyond the Feather, the Thread was extended and stood upright in the Air, as if it had been a piece of a Wire, though the Feather was distant from the Paper near an Inch [2.5 cm].

²³[DF33b, pp. 473–474].

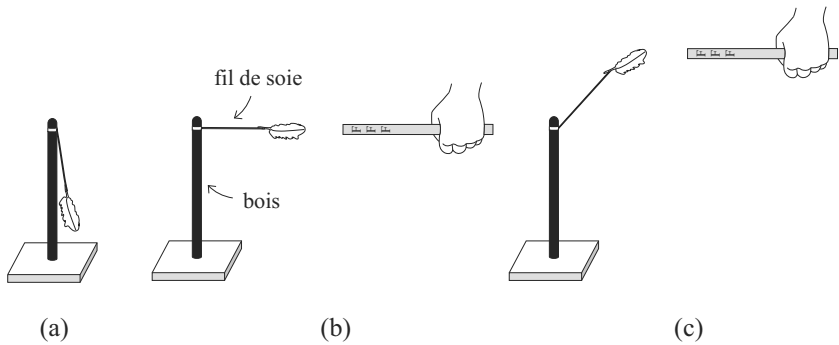


FIG. 4.21 : Pendule électrique de Gray.

soutenue par la tête d'un clou enfoncé dans une planche. La particularité du versorium de Du Fay est que nous enveloppons l'une de ses extrémités dans de la feuille d'aluminium. Il existe deux possibilités pour équilibrer le versorium s'il commence à tomber de ce côté en raison de son poids supplémentaire. La première consiste à coller du plastique à l'autre extrémité. La seconde consiste à retirer une petite partie de la patte où la feuille d'aluminium sera fixée avant de réaliser l'expérience. Le point important est que le versorium doit être équilibré horizontalement, avec l'une de ses pattes enveloppée dans une feuille d'aluminium, figure 4.22.

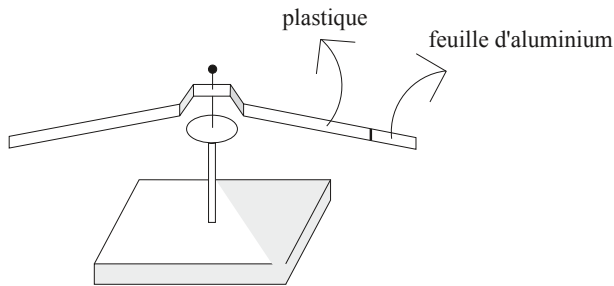


FIG. 4.22 : Le versorium de Du Fay est en plastique, avec l'extrémité d'une de ses pattes enveloppée dans une feuille d'aluminium.

Il est conseillé de toucher une surface métallique pour s'assurer que l'on est neutre avant de réaliser les expériences suivantes. Afin de réaliser des expériences avec ce versorium, il est important de s'assurer qu'il est initialement neutre. C'est l'aspect le plus délicat, principalement en raison du plastique. Afin d'obtenir la neutralité de charge, nous touchons la feuille d'aluminium avec notre doigt pour la décharger. Nous plaçons ensuite notre doigt près de plusieurs parties du versorium en plastique, sans les toucher. Si le versorium reste immobile, sans être orienté par notre doigt, nous disons qu'il est électriquement neutre. Lorsqu'il réagit au rapprochement du doigt, nous disons qu'il est chargé. Il arrive parfois que nous le chargions involontairement par frottement avec notre main pendant sa fabrication ou lorsque nous enroulons la

feuille d'aluminium autour de l'une de ses extrémités. Si cela se produit, nous pouvons attendre quelques minutes pour qu'il se décharge naturellement. Nous pouvons également le nettoyer avec une serviette en papier humide et attendre qu'il sèche. Même après ces procédures, nous devons toujours vérifier s'il est vraiment neutre. À partir de maintenant, nous supposons que le versorium est neutre avant de commencer les expériences suivantes.

Expérience 4.11

Nous frottons une paille en plastique et l'approchons lentement de la feuille d'aluminium du versorium de Du Fay, sans les laisser entrer en contact. Nous observons que le versorium tourne autour de son axe vertical, s'arrêtant avec la feuille d'aluminium pointant vers le plastique frotté, figure 4.23. Lorsque nous déplaçons la paille, le versorium la suit. Ceci est analogue à l'expérience 3.1.

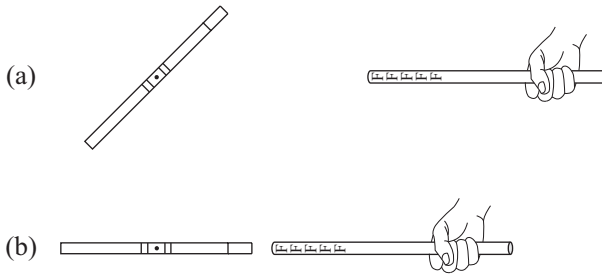


FIG. 4.23 : Feuille d'aluminium du versorium de Du Fay attirée par un morceau de plastique frotté approché d'elle.

Expérience 4.12

Nous répétons l'expérience 4.11. Mais cette fois-ci, nous rapprochons la paille frottée de la feuille d'aluminium, afin qu'elles entrent en contact. Nous observons qu'elle est d'abord attirée par la paille, puis repoussée par celle-ci, s'éloignant de la paille, figure 4.24. Entre cette attraction et cette répulsion, quelque chose de crucial se produit : le « contact » entre la feuille d'aluminium et le plastique frotté.

Parfois, la feuille d'aluminium n'est pas immédiatement repoussée après le contact et reste attachée à la paille. Si cela se produit, il sera nécessaire de libérer la feuille d'aluminium afin de pouvoir observer la répulsion suivante. Pour ce faire, vous pouvez tapoter la paille ou la déplacer de haut en bas avec la feuille d'aluminium. Normalement, elles se détacheront l'une de l'autre au cours de cette procédure. Une fois libérée, la feuille d'aluminium commencera à être repoussée par la paille frottée et s'en éloignera.

Expérience 4.13

Nous répétons l'expérience 4.12. À la fin de l'expérience, nous retirons la paille frottée. Nous approchons ensuite lentement notre doigt (ou une feuille de papier, ou

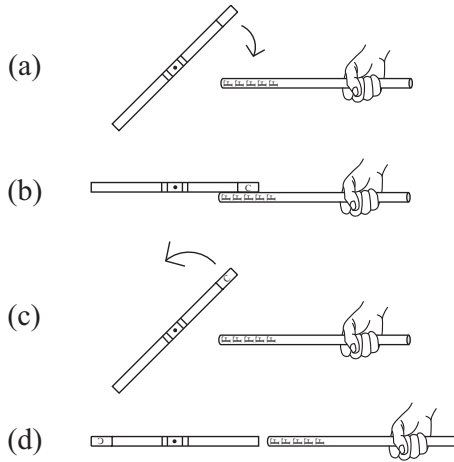


FIG. 4.24 : (a) La feuille d'aluminium est initialement attirée par le plastique frotté. (b) La feuille d'aluminium touche la partie frottée de la paille. (c) Après le contact, la feuille d'aluminium est repoussée par la paille. (d) Orientation finale d'équilibre du versorium.

une brochette en bois) de la feuille d'aluminium, sans les laisser entrer en contact. Nous observons que la feuille d'aluminium est attirée par le doigt, pointant vers lui et suivant son mouvement, figure 4.25 !

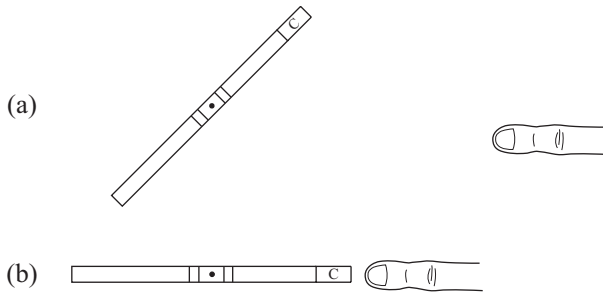


FIG. 4.25 : La feuille d'aluminium qui avait précédemment touché un morceau de plastique frotté est désormais attirée par un doigt qui s'en approche.

Comme nous l'avons vu dans la section 3.5, cette expérience montre que la feuille d'aluminium du versorium de Du Fay s'est chargée lorsqu'elle a touché le plastique frotté.

Il convient de rappeler ici que cette expérience, ainsi que plusieurs autres décrites dans cet ouvrage, peuvent ne pas fonctionner parfaitement s'il a plu récemment ou si l'air est humide. L'humidité de l'air rend difficile l'accumulation de charges électriques et diminue ainsi l'ampleur des effets observables. Les expériences électrostatiques fonctionnent généralement bien dans des atmosphères sèches.

Expérience 4.14

Afin de répéter toute cette série d'expériences avec le même versorium de Du Fay, nous devons d'abord toucher la feuille d'aluminium avec notre doigt. Ensuite, lorsque nous approchons à nouveau un doigt ou une feuille de papier de la feuille d'aluminium, nous observons qu'elle ne réagit plus et reste immobile. Elle n'est plus attirée par le doigt, comme c'était le cas auparavant dans l'expérience 4.13.

Lorsque nous rapprochons à nouveau la paille frottée de la feuille d'aluminium, nous observons le même comportement qu'auparavant, à savoir l'attraction, le contact et la répulsion.

Chaque fois que nous touchons la feuille d'aluminium avec notre doigt, nous pouvons recommencer toute la procédure, car le versorium revient à son état initial.

4.8 Le mécanisme ACR

En 1733, Du Fay fut le premier à reconnaître le mécanisme fondamental de l'attraction, du contact (ou communication de l'électricité par rapprochement) et de la répulsion décrit dans l'expérience 4.10. Heilbron a désigné cette règle simple d'Attraction, de Communication de l'électricité et de Répulsion par le sigle ACR.²⁴ Ce comportement régulier a été considéré à juste titre par Du Fay comme une grande découverte. Après tout, ce principe explique un large éventail de phénomènes électriques.

Du Fay avait réalisé quelques expériences antérieures et observé un comportement qui lui avait permis de classer ou de distinguer différentes substances. Lorsqu'il frottait un corps et le rapprochait de substances légères, il observait que certaines de ces substances subissaient une attraction plus forte que d'autres substances de même poids. Il constatait que les substances les plus facilement attirées correspondaient exactement aux substances qui acquéraient une charge plus faible par frottement. Un exemple de ce comportement a été observé dans les sections 2.4 et 2.7. Les petits morceaux de plastique ou de soie, par exemple, sont beaucoup moins attirés par un plastique frotté que les petits morceaux de métal ou de papier. D'autre part, nous pouvons électriser le plastique et la soie plus facilement par frottement que le papier ou le métal.

À l'époque de Du Fay, les corps qui avaient la propriété d'attirer les substances légères lorsqu'ils étaient frottés étaient communément appelés « électriques ». Un corps électrique était considéré comme bon ou mauvais selon la force plus ou moins grande avec laquelle il attirait les corps légers après avoir été frotté. Après cette introduction, nous pouvons citer les propres mots de Du Fay décrivant le principe ACR :²⁵

Enfin ayant réfléchi sur ce que les corps les moins électriques par eux-mêmes étoient plus vivement attirés que les autres, j'ai imaginé que le corps électrique attiroit peut-être tous ceux que ne le sont point, & repousoit tous ceux que le sont devenus par son approche, & par la communication de sa vertu. [...]

Du Fay poursuivit et décrivit les expériences qu'il a menées, analogues à celles de Guericke, Gray et Hauksbee. (Voir l'expérience 4.4). En effet, il parvint à faire flotter

²⁴[Hei99, pp. 5 et 255–258].

²⁵[DF33b, p. 458].

dans l'air un morceau de feuille d'or qui avait été libéré au-dessus d'un tube en verre frotté. La feuille fut d'abord attirée par le tube, le toucha, puis en fut repoussée, flottant au-dessus de celui-ci. Il poursuivit en écrivant (c'est nous qui soulignons en italique).²⁶

L'explication de tous ces faits est bien simple, en supposant le principe que je viens d'avancer ; car, dans le première expérience, lorsqu'on laisse tomber la feuille sur le tube, il attire vivement cette feuille qui n'est nullement électrique, mais dès qu'elle a touché le tube, ou qu'elle l'a seulement approché, elle est rendue électrique elle-même, & par conséquent elle en est repoussée, & s'en tient toujours éloignée, jusqu'à ce que le petit tourbillon électrique qu'elle avoit contracté soit dissipé, ou du moins considérablement diminué ; n'étant plus repoussée alors, elle retombe sur le tube où elle reprend un nouveau tourbillon, & par conséquent de nouvelles forces pour l'éviter, ce qui continuera tant que le tube conservera sa vertu.

Voici une autre description de ce *principe* :^{27,28}

En réalisant l'expérience relatée par *Otho de Gueric* dans son recueil d'expériences *de Spatio Vacuo* [1672], qui consiste à rendre une boule de soufre électrique afin de repousser une plume, j'ai remarqué que les mêmes effets étaient produits non seulement par le tube [frotté], mais aussi par tous les corps électriques, quels qu'ils soient ; et j'ai découvert un principe très simple qui explique une grande partie des irrégularités et, si je peux employer ce terme, des caprices qui semblent accompagner la plupart des expériences sur l'électricité. Ce principe est que les corps électriques attirent tous ceux qui ne le sont pas et les repoussent dès qu'ils deviennent électriques, par la proximité ou le contact du corps électrique. Ainsi, la feuille d'or est d'abord attirée par le tube [frotté] ; elle acquiert une électricité s'en approchant et, par conséquent, est immédiatement repoussée par celui-ci. Elle n'est pas non plus réattrirée tant qu'elle conserve sa qualité électrique. Mais si, alors qu'elle est ainsi maintenue dans l'air, elle vient à se poser sur un autre corps, elle perd immédiatement son électricité et est par conséquent réattrirée par le tube qui, après lui avoir donné une nouvelle électricité, la repousse une seconde fois, ce qui se poursuit tant que le tube conserve son électricité. En appliquant ce principe aux différentes expériences sur l'électricité, on sera surpris du nombre de faits obscurs et déroutants qu'il permet d'éclaircir.

²⁶ [DF33b, pp. 459–460].

²⁷ [DF34a, pp. 262–263].

²⁸ On making the experiment Related by *Otho de Gueric*, in his Collection of Experiments *de Spatio Vacuo* [1672], which consists in making a Ball of Sulphur render'd Electrical, to repel a Down-Feather, I perceived that the same Effects were produced not only by the [rubbed] Tube, but by all electric Bodies whatsoever ; and I discovered a very simple Principle, which accounts for a great Part of the Irregularities, and if I may use the Term, of the Caprices that seem to accompany most of the Experiments on Electricity. This Principle is, that Electric Bodies attract all those that are not so, and repel them as soon as they are become electric, by the Vicinity or Contact of the electric Body. Thus Leaf-Gold is first attracted by the [rubbed glass] Tube ; and acquires an Electricity by approaching it ; and of consequence is immediately repell'd by it. Nor is it re-attracted, while it retains its electric Quality. But if, while it is thus sustain'd in the Air, it chance to light on some other Body, it straightways loses its Electricity ; and consequently is re-attracted by the Tube, which, after having given it a new Electricity, repels it a second time ; which continues as long as the Tube keeps its Electricity. Upon applying this Principle to the various Experiments of Electricity, one will be surpris'd at the Number of obscure and puzzling Facts it clears up.

Expérience 4.15

Nous pouvons faire osciller le pendule électrique en réalisant une expérience curieuse. Nous plaçons la main gauche avec quatre doigts près du disque en papier, sans le toucher. La main restera toujours dans cette position pendant toute l'expérience. Nous frottons une paille en plastique et l'approchons lentement du disque en papier. Une fois que le disque l'a touché, la paille doit rester immobile.

Nous observons que le pendule est d'abord attiré par le plastique frotté, le touche, en est repoussé, se déplace vers la main, la touche, puis est à nouveau attiré par le plastique. L'ensemble du processus se répète pendant quelques oscillations rapides du papier, qui touche alternativement le plastique frotté et la main de l'autre côté. Nous pouvons augmenter le nombre de ces oscillations en tournant la paille autour de son axe pendant l'expérience, ou en déplaçant la paille verticalement sur toute sa longueur pendant les oscillations, figure 4.26.

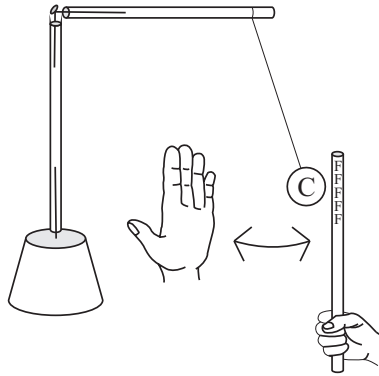


FIG. 4.26 : Pendule oscillant entre un plastique frotté et une main, et touchant chacun d'eux.

Il est possible de décrire ce qui se passe dans cette expérience en se référant au mécanisme ACR. Cette expérience est analogue à celle de Gray avec la plume flottante, qui oscille dans l'air entre le tube de verre frotté et un objet solide (comme un mur ou une chaise). Voir la section 4.2.

Expérience 4.16

Nous plaçons maintenant côte à côte deux pendules électriques similaires à celui utilisé dans l'expérience 4.7. Lorsque les deux sont neutres, les deux fils restent verticaux. Nous pouvons obtenir cet effet en touchant les deux disques en papier avec notre main.

Nous frottons une paille en plastique et l'approchons de chaque disque en papier, leur permettant de toucher la paille et d'être repoussés par celle-ci. Nous retirons ensuite la paille. Puis, nous rapprochons les pendules qui ont été chargés par contact. Nous observons qu'ils se repoussent. Les deux fils s'inclinent par rapport à la verticale, s'éloignant l'un de l'autre, figure 4.27.

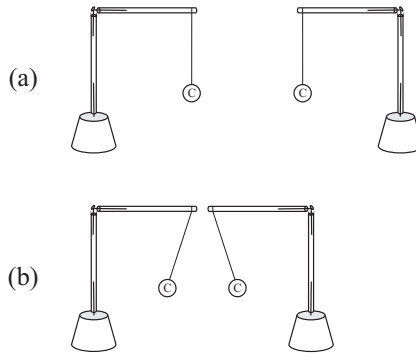


FIG. 4.27 : (a) Deux pendules chargés pendent verticalement lorsqu'ils sont éloignés l'un de l'autre. (b) Deux pendules chargés se repoussent lorsqu'ils sont proches l'un de l'autre.

Il est parfois nécessaire d'utiliser des fils de soie très fins pour observer cette séparation latérale. Lorsque les fils sont très denses et lourds, leur poids réduit l'angle de séparation. De plus, des fils plus courts créent des angles de séparation plus importants entre eux que des fils plus longs, pour une même distance finale entre les disques de papier. Il est donc préférable de travailler avec des fils courts, car cela rend la répulsion plus visible.

Dans cette expérience, nous observons la répulsion entre deux pendules qui ont été chargés par contact avec un seul corps électrisé.

Cette expérience illustre également l'action et la réaction entre deux corps électrisés, un sujet abordé précédemment dans la section 3.5.

Expérience 4.17

Une expérience analogue peut être réalisée en remplaçant les disques de papier par deux petites boules froissées en feuille d'aluminium. Chaque boule peut être de forme carrée ou circulaire, avec un côté ou un diamètre de 2 à 3 cm. Une fois froissées, elles sont attachées aux extrémités de deux fils de soie de même longueur suspendus comme des pendules. Nous chargeons les deux boules par contact avec un plastique frotté, qui est ensuite éloigné. Après cette procédure, elles se repoussent mutuellement lorsque les pendules sont placés à proximité l'un de l'autre. Plus les fils sont courts, plus l'angle de séparation sera grand pour une distance constante entre les extrémités supérieures des fils.

4.9 Le fil pendulaire de Gray

Outre le pendule électrique, il est également intéressant de fabriquer un autre instrument appelé « fil pendulaire ». Il a été créé par Stephen Gray en 1729 afin de détecter si un corps est chargé.²⁹

²⁹[Gra31b], [Gra31c], et [Gra35b].

Il s'agit simplement d'un fil de coton ou de lin soutenu par un bâton en bois, figure 4.28. Le pendule électrique était fabriqué avec un fil de soie ou de nylon. Ici, il est important d'utiliser un fil de coton ou de lin. Nous pouvons tenir le bâton à la main ou le fixer à un autre support approprié.



FIG. 4.28 : Fil pendulaire de Gray.

Expérience 4.18

Nous approchons un morceau de plastique neutre d'un fil pendulaire. Rien ne se passe, car il reste vertical. Nous approchons maintenant un morceau de plastique frotté d'un pendulaire. Le fil s'incline vers lui, figure 4.29.

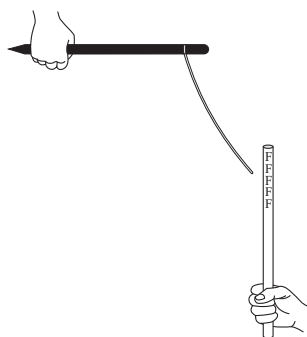


FIG. 4.29 : Attraction d'un fil suspendu par un plastique frotté.

C'est la principale utilité du fil pendulaire. Il nous indique si un objet proche est chargé ou non. Le fil pendulaire de Gray était simplement un fil vertical soutenu par son extrémité supérieure, dont l'extrémité inférieure était libre de se déplacer dans n'importe quelle direction. Le fil était en coton ou en lin, sans aucune plume ni autre corps à son extrémité inférieure. Afin de tester si un corps était chargé, il suffisait d'approcher le fil de celui-ci. Lorsque le fil était attiré par le corps, s'inclinant vers lui, cela signifiait que l'objet était chargé électriquement. La procédure normale pour déterminer si un corps était chargé ou non consistait à observer s'il attirait les substances légères à proximité, comme dans l'expérience 2.1. Avec son instrument, Gray avait trouvé une nouvelle méthode, l'inclinaison de son fil. Il mentionnait explicitement que cette nouvelle méthode offrait une plus grande sensibilité que l'ancienne :^{30,31}

³⁰[Gra31c, p. 289].

³¹The manner of observing these Attractions is best performed by holding the Attracting Body in one

La meilleure façon d'observer ces attractions consiste à tenir le corps attractif dans une main et un fin fil blanc attaché à l'extrémité d'un bâton dans l'autre [main] ; de cette manière, on percevra des degrés d'attraction bien moindres qu'en utilisant [des morceaux] de laiton.

Expérience 4.19

Nous laissons maintenant le fil pendulaire toucher le plastique frotté. Nous observons qu'il reste collé à celui-ci, figure 4.30.

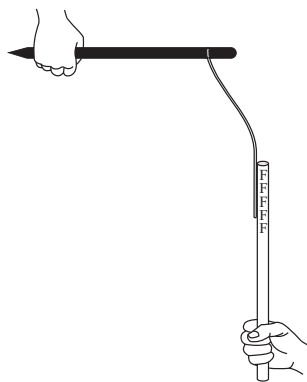


FIG. 4.30 : Le fil pendulaire de Gray reste collé à un plastique frotté après contact.

Cela diffère de ce qui s'est passé dans l'expérience 4.7. Dans cette expérience précédente, le pendule électrique a été repoussé après avoir été en contact avec le plastique frotté. Cela signifie que le pendule électrique et le fil pendulaire sont des instruments différents, qui présentent des comportements différents dans des situations analogues. Le fil pendulaire n'est pas simplement un pendule électrique sans le disque en papier.

4.10 La cartographie de la force électrique

Nous pouvons adapter un pendule électrique pour cartographier la force électrique, par analogie avec ce qui a été fait avec le versorium dans la section 3.4. Pour ce faire, nous devons fabriquer un indicateur de force électrique. Il s'agit essentiellement d'un pendule électrique dans lequel nous remplaçons le disque en papier par une petite flèche en papier, en feuille d'aluminium ou en carton fin. Elle 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. Il s'agit uniquement de mesures approximatives qui ne sont pas très importantes.

Hand, and a fine white Thread tied to the End of a Stick, in the other [hand] ; by this means far less Degrees of Attraction will be perceived, than by making use of [pieces of] Leaf-Brass.

Une façon pratique de fabriquer et de fixer la flèche consiste à utiliser une paille en plastique.³² La flèche en carton fin peut mesurer initialement 4 à 6 cm de long, avec une largeur de tige de 0,2 à 0,5 cm et une dimension maximale de la pointe de 0,5 à 0,7 cm, par exemple. Nous coupons une paille en plastique de 3 à 5 cm de long. Nous appliquons de la colle sur un côté de la flèche et collons la partie inférieure du fil de soie et la paille sur ce côté. Nous plions la tige de la flèche autour de la paille, en les fixant ensemble. La flèche doit être horizontale lorsqu'elle est suspendue librement. Si ce n'est pas le cas, nous pouvons couper une partie de la paille afin que la flèche soit dans la bonne position. Plusieurs indicateurs de force électrique comme celui-ci doivent être construits, figure 4.31.

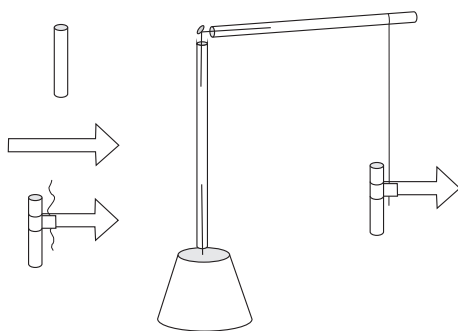


FIG. 4.31 : Un indicateur de force électrique.

Expérience 4.20

Nous répétons maintenant la procédure de l'expérience 4.5. C'est-à-dire que nous frottons une paille en plastique placée verticalement dans un support approprié. Nous l'approchons ensuite lentement de l'indicateur de force électrique, en évitant dans un premier temps que la flèche touche le plastique frotté. Nous observons que le pendule est attiré par le plastique frotté, le fil s'inclinant vers celui-ci. De plus, la pointe de la flèche pointe vers la paille frottée, quelle que soit sa position par rapport au plastique frotté. Cela montre que la force électrique exercée par le plastique frotté pointe vers celui-ci, comme nous l'avons vu dans l'expérience 3.4.

Expérience 4.21

Nous répétons maintenant l'expérience 4.20, en laissant cette fois la flèche et le plastique frotté entrer en contact. Après le contact, le pendule est repoussé par la paille, le fil s'éloignant de celle-ci. De plus, la pointe de la flèche pointe radialement à l'opposé du plastique frotté, figure 4.32.

³²[FM91].

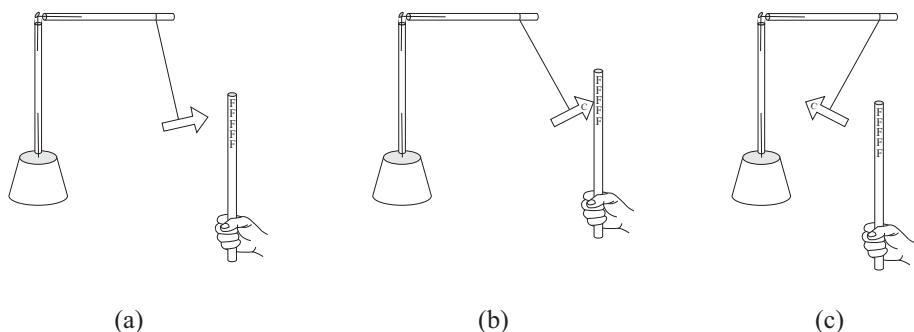


FIG. 4.32 : (a) Au départ, la flèche pointe vers le plastique frotté, car elle est attirée par celui-ci. (b) Elle touche la paille. (c) Après le contact, la flèche est repoussée par la paille, la pointe de la flèche s'éloignant de la paille.

Expérience 4.22

Nous utilisons maintenant plusieurs indicateurs de force électrique autour d'un plastique frotté. La procédure initiale est similaire à celle de l'expérience 4.20, à savoir empêcher les contacts entre les flèches et la paille. Nous observons qu'elles pointent toutes vers le plastique frotté, figure 4.33 (a). Nous permettons maintenant à la paille frottée et aux flèches d'entrer en contact. Nous observons qu'après le contact, elles pointent toutes radialement loin de la paille, figure 4.33 (b).

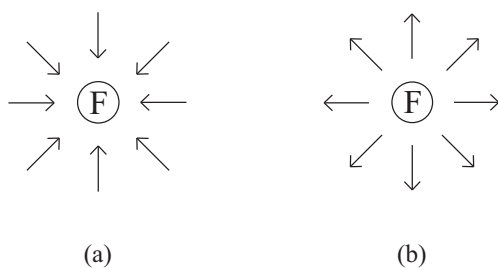


FIG. 4.33 : (a) Avant le contact, les flèches pointent vers la paille frottée, attirées par celle-ci. (b) Après le contact, elles pointent loin du plastique, repoussées par celui-ci.

La principale différence entre les expériences 4.20, 4.21 et 4.22, d'une part, et l'expérience 3.4 d'autre part, est que désormais les flèches indiquent non seulement la direction de la force (dans ce cas une direction radiale), mais aussi si la force est attractive (flèches pointant vers la paille frottée) ou répulsive (flèches pointant loin de la paille frottée).

Expérience 4.23

La même expérience peut être répétée avec la paille frottée en position horizontale. Avant le contact, les flèches pointent vers elle, après le contact, elles s'en éloignent,

comme le montre la figure 4.34.

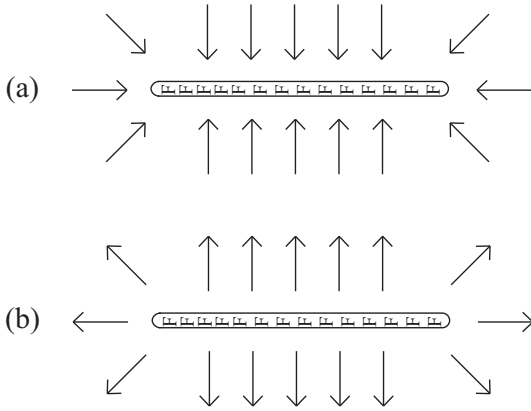


FIG. 4.34 : (a) Les flèches qui n'ont pas touché la paille frottée sont attirées par celle-ci. (b) Après contact, elles en sont repoussées.

Expérience 4.24

Nous frottons maintenant deux pailles en plastique sur toute leur longueur avec le même matériau, comme une feuille de papier. Ces pailles sont placées côte à côte verticalement sur des supports appropriés. L'indicateur de force électrique est déplacé près des pailles, sans les laisser entrer en contact les unes avec les autres. Nous observons que la flèche est attirée par les deux pailles, s'inclinant vers elles. L'orientation de plusieurs flèches à différents endroits autour des pailles est présentée dans la figure 4.35 (a). L'orientation de chaque flèche résulte de l'influence des deux pailles. Cela s'apparente à une addition vectorielle des forces ou des couples exercés par chaque paille. Ceci est analogue à l'expérience 3.5.

Nous répétons cette expérience, mais en permettant cette fois le contact entre les pailles et les plastiques frottés. Après le contact, les flèches sont repoussées par les pailles, comme indiqué dans la figure 4.35 (b).

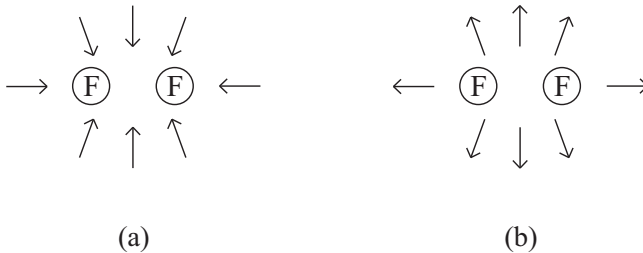


FIG. 4.35 : Indicateurs de force électrique attirés (a) et repoussés (b) par deux plastiques frottés.

Ces expériences indiquent la nature vectorielle des forces électriques, qu'elles soient attractives ou répulsives. L'avantage de ces représentations à l'aide de flèches, par rapport à la représentation à l'aide de versoria, est que les flèches indiquent non seulement la direction des forces, mais aussi si elles sont attractives ou répulsives.

Expérience 4.25

Le même effet peut être obtenu avec plusieurs versoria de Du Fay, au lieu de simples versoria métalliques. Nous frottons un plastique et plaçons la partie frottée au même niveau que le plan des versoria. Nous déplaçons le plastique frotté près des versoria, en évitant qu'ils se touchent. Les versoria tournent autour de leur axe. Après avoir atteint l'équilibre et s'être arrêtées, les feuilles d'aluminium des versoria pointent vers le plastique frotté, figure 4.36 (a).

Nous permettons alors le contact entre le plastique frotté et les feuilles d'aluminium, jusqu'à ce qu'elles soient repoussées par le plastique. Les versoria tournent et, dans les nouvelles positions d'équilibre, les feuilles d'aluminium pointent loin de la paille frottée, figure 4.36 (b).

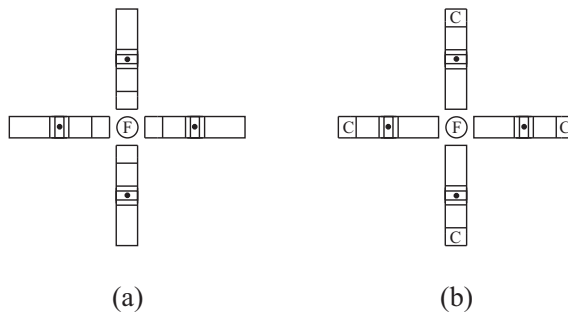


FIG. 4.36 : (a) La feuille d'aluminium de chaque versorium de Du Fay est attirée par un morceau de plastique frotté. (b) Après contact, elle est repoussée par la paille chargée.

Avec les versoria de Du Fay, nous pouvons également obtenir des cartographies analogues à ceux des expériences 4.23 et 4.24.

4.11 Hauksbee et la cartographie des forces électriques

Hauksbee fut probablement le premier à cartographier les forces électriques en 1706. Il utilisa la machine électrique qu'il avait inventée, décrite dans la section 4.2, figure 4.8. Il a remplacé le globe de verre par un tube de verre cylindrique, soutenu horizontalement ou verticalement, afin qu'il puisse le tourner à grande vitesse sur son axe. Pendant qu'il tournait, il était frotté avec les mains ou avec une feuille de papier. Voici la description de son expérience :^{33,34}

³³[Hau06, pp. 2332–2335].

³⁴A Continuation of the Experiments on the Attrition of Glass.

Suite des expériences sur l'attrition du verre.

Je me suis procuré un verre presque cylindrique, d'une longueur et d'un diamètre d'environ sept pouces [18 cm] chacun, dont le mouvement [rotation autour de son axe de symétrie] était assuré par une machine d'un nouveau type; son axe était parallèle à l'horizon, qui, dans des expériences similaires réalisées jusqu'alors, lui était diamétralement opposé. [...]

Ce que j'ai à ajouter maintenant résulte de l'observation constante que les corps légers qui s'approchaient d'une partie quelconque du cylindre affûté semblaient être attirés ou graviter de manière égale; j'ai donc conçu un demi-cercle de fil métallique, que je pouvais fixer à une distance constante [de l'axe du cylindre], entourant la surface supérieure du verre à environ 4 ou 5 pouces [10 ou 13 cm] de celui-ci. Ce fil métallique était enroulé autour d'une ficelle, ce qui me permettait d'y suspendre facilement les fils [de lin, de coton ou de laine] à des distances presque égales; les extrémités inférieures de ceux-ci atteignant moins d'un pouce [2,5 cm] du verre, lorsqu'ils étaient maintenus près du centre de celui-ci, mais apparaissaient, lorsqu'ils étaient libres, comme le montre la figure 1 [de la figure 4.37].³⁵

Et lorsque le cylindre tournait assez rapidement, ces fils apparaissaient dans l'air agité, comme dans la figure 2 [de la figure 4.37]. Mais lorsque j'appliquais ma main sur la partie inférieure du verre [en rotation] [afin de charger le verre par friction], les fils prenaient alors une forme similaire à celle de la figure 3 [de la figure 4.37]. Et de toutes parts, ils semblaient graviter, ou étaient attirés en ligne droite vers le centre du corps en mouvement [c'est-à-dire vers l'axe du cylindre], sans subir aucun inconvénient ni désordre de posture dû au vent provoqué par la rapidité du mouvement; et je pouvais, en déplaçant la [position de] l'attrition, les attirer

I Procur'd a Glass nearly Cylindrical, of the Length and Diameter about seven Inches each [18 cm], whose motion [rotation around its axis of symmetry] was given by a Machine of a new Contrivance; its Axis lying parallel to the Horizon, which in like Experiments heretofore made, was Diametrically opposite to it. [...]

Now what farther I have to add, occur'd from observing always that Light Bodies, approach'd near any part of the affricated Cylinder, would seemingly be equally Attracted, or Gravitate; so that I contriv'd a Semi-circle of Wire, which I could fasten at a constant distance [from the axis of the cylinder], environing the upper Surface of the Glass at 4 or 5 inches [10 or 13 cm] from it. This Wire had twisted round it some Pack-thread, whereby I could with Ease hang the [linen, cotton, or woolen] Threads at pretty nearly equal distances; the lower ends of which reaching within less than an Inch [2.5 cm] of the Glass, when held approaching the Center of it, but appear'd, when at liberty, as Figure the 1st.

And when the Cylinder was pretty swiftly turn'd about, those Threads would appear by the agitated Air, as in Fig. the 2d. But when on the lower part of the [spinning] Glass was applied my hand [in order to charge the glass by friction], the Threads would then represent a Form like Fig. the 3d. And from all parts seem to Gravitate, or were attracted in a direct Line to the Center of the moving Body [that is, towards the axis of the cylinder], suffering no Inconvenience or Disorder of Posture by the Wind occasioned by the Rapidity of the motion; and I could by shifting the [position of] Attrition, draw them in a Line towards either end of the Cylinder; yet still pointing to the Axis of it. And if the [semi-circular] Wire with the Threads be revers'd, as I have tryed since, that is, encompassing the under part of the Cylinder, as before the upper, it answer'd exactly the same as the other; the Threads all pointing to the Axis of it: See Fig. the 4th. I have likewise given a Motion to the same Glass in a perpendicular Posture, by which means I had the opportunity of placing a Hoop-Wire Horizontally, with Threads as before, and left only one small part expos'd for the touch of my Fingers between them; yet the Threads upon the Motion and Attrition given the Cylinder, elevated themselves from their hanging Posture, making all round an Horizontal Plain, directing their loose ends to the Axis as in the other. Now how far this Experiment may serve to explain the Nature of Electricity, Magnetism, or Gravitation of Bodies, is beyond my Sphere to determine; but with all Humility submit it to those Learned Gentlemen of this Honourable Society, who have already treated on those Subjects.

³⁵[Hau06] et [RR57, p. 568].

en ligne vers l'une ou l'autre extrémité du cylindre, tout en continuant à pointer vers son axe. Et si le fil [semi-circulaire] avec les fils est inversé, comme je l'ai essayé depuis, c'est-à-dire en entourant la partie inférieure du cylindre, comme auparavant la partie supérieure, il a répondu exactement de la même manière que l'autre ; les fils pointant tous vers son axe : voir la figure 4 [de la figure 4.37]. J'ai également donné un mouvement au même verre dans une position perpendiculaire, ce qui m'a permis de placer un fil métallique horizontalement, avec des fils comme auparavant, et de ne laisser qu'une petite partie exposée au toucher de mes doigts entre eux ; cependant, les fils, sous l'effet du mouvement et de l'attrition exercés sur le cylindre, se sont élevés de leur position suspendue, formant un plan horizontal complet, leurs extrémités libres étant dirigées vers l'axe comme dans l'autre cas. Maintenant, dans quelle mesure cette expérience peut servir à expliquer la nature de l'électricité, du magnétisme ou de la gravitation des corps, cela dépasse ma compétence pour le déterminer ; mais avec toute humilité, je la soumetts à ces éminents gentlemen de cette honorable société, qui ont déjà traité de ces sujets.

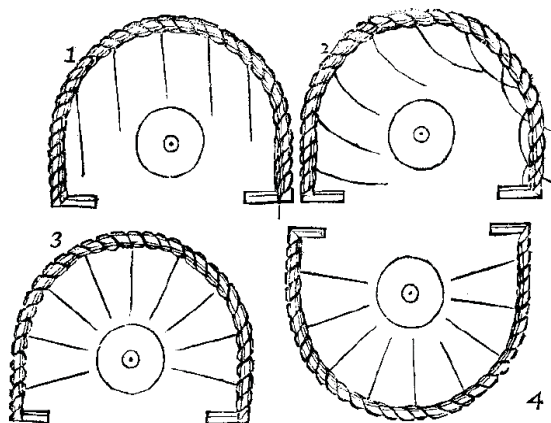


FIG. 4.37 : Cartographie de la force électrique de Hauksbee. Vue de bout du cylindre en verre montrant les positions des fils lorsque le cylindre est : (1) immobile et non électrisé ; (2) en rotation et non électrisé, les courants d'air autour de lui entraînant les fils tous dans la même direction ; (3) et (4), en rotation et électrisé, auquel cas, malgré la présence continue des courants d'air, chaque fil se redresse et pointe vers l'axe du cylindre.

Chapitre 5

Les charges positives et négatives

5.1 Existe-t-il un seul type de charge ?

Nous allons maintenant réaliser quelques expériences analogues à l'expérience 4.7. Nous utilisons les instruments suivants : deux pendules électriques, appelés *I* et *II*, et un versorium métallique. De plus, nous utilisons les matériaux suivants : deux pailles en plastique, deux règles en acrylique, deux verres, deux bas en soie et deux morceaux de tissu en fils acryliques. Ces matériaux et leurs formes, tels qu'ils sont représentés dans les expériences suivantes, sont décrits dans la figure 5.1. Au lieu de deux bas en soie, nous pouvons également utiliser deux tissus en polyamide synthétique.

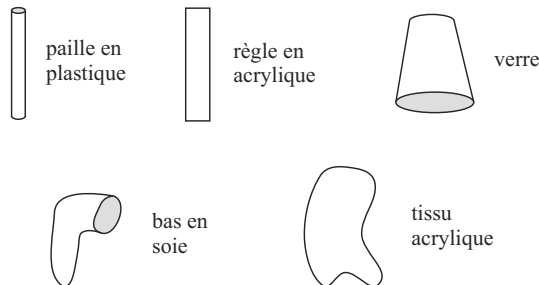


FIG. 5.1 : Matériaux utilisés dans les expériences suivantes.

Les bobines de « laine » vendues habituellement dans les magasins sont aujourd'hui composées à 100% de fils acryliques synthétiques. Nous supposons que nous utilisons un tissu ou un chemisier fabriqué à partir de ces fils acryliques. En ce qui concerne les bas, il faut veiller à n'utiliser que ceux en soie ou en tissu polyamide synthétique. Dans les figures suivantes, nous appellerons « bas de soie » l'un de ces bas ou l'un de ces tissus polyamides synthétiques.

Le but de ces expériences est de montrer que différents matériaux frottés présentent des charges électriques différentes. Avant de commencer chaque expérience, nous devons toucher le versorium et les disques en papier des pendules électriques avec notre doigt afin de les décharger. Cette opération doit être répétée avant d'approcher chacun des objets frottés des pendules. Le versorium sera utilisé pour vérifier si les corps sont neutres ou chargés. Une paille, une tasse, un bas et une règle doivent être neutres, sans affecter le versorium, et ils ne seront pas frottés pendant l'expérience.

Pour que le verre soit électrisé, il doit généralement être sec. De plus, le verre doit être réchauffé avant d'être frotté, sinon il se déchargera à travers notre main. La manipulation laisse de la sueur sur le verre, ce qui doit être évité. Il peut être réchauffé au feu ou au micro-ondes avant chaque processus de friction. Si un verre ne peut pas être chargé, vous devrez peut-être essayer d'autres mélanges de verre ou d'autres types de verre jusqu'à ce que vous trouviez un verre pouvant être chargé de manière adéquate.

Les chiffons en acrylique seront utilisés pour frotter tous ces matériaux. Nous pouvons tenir la paille en plastique (ou la règle en acrylique, ou le bas en soie) avec le chiffon en acrylique et tirer rapidement sur la paille. Nous pouvons également frotter rapidement le chiffon sur la surface du verre.

Lorsque nous frottons un objet avec le bas en soie, cela sera représenté par la lettre *S* sur le corps. Lorsque cet objet est frotté avec un chiffon acrylique, cela sera représenté par la lettre *A*. Nous utiliserons deux lettres sur des disques en papier qui ont d'abord touché les corps frottés, puis ont été repoussés par ceux-ci. La première lettre représente la substance de l'objet touché par le disque en papier. La deuxième lettre représente le matériau avec lequel l'objet a été frotté. Les matériaux composant les objets seront représentés par les lettres *P*, *V*, *A* et *S*. Elles indiquent respectivement le plastique, le verre, l'acrylique et la soie. Par exemple, les lettres *PA* sur un disque en papier indiquent qu'il a touché un morceau de Plastique qui avait été frotté avec un chiffon en Acrylique, et que le disque en papier a ensuite été repoussé par le plastique frotté.

Nous touchons d'abord le versorium et les deux disques en papier des pendules avec notre doigt. Nous approchons la paille non frottée (ou le verre, le bas, la règle ou le tissu) du versorium, en observant que tous ces corps sont électriquement neutres, car ils ne doivent pas orienter le versorium. Lorsque l'un de ces matériaux non frottés oriente le versorium, il doit être remplacé par un autre matériau non frotté qui n'oriente pas le versorium et qui est donc réellement électriquement neutre. Au cours des expériences, nous froterons une paille, un verre, un bas et une règle. Les expériences suivantes ne fonctionnent que lorsque ces objets sont correctement chargés par frottement. Afin de nous assurer que ce mécanisme de charge a fonctionné, nous approcherons chacun de ces objets du versorium avant de les approcher des pendules. Nous ne devons poursuivre l'expérience que lorsque le versorium s'oriente vers ces corps. Cette précaution est particulièrement importante dans le cas du verre. Comme mentionné précédemment, il n'est pas toujours facile de maintenir un verre frotté sous tension. Le contact avec notre main peut facilement le décharger. À partir de maintenant, nous supposerons que tous les objets frottés ont été chargés avec succès.

Expérience 5.1

Une paille en plastique qui a été frottée avec un chiffon acrylique s'approche du premier pendule neutre. Le pendule est attiré, touche la paille, puis en est repoussé, figure 5.2 (a). Nous retirons le plastique et le pendule revient à la verticale. Nous frottons un bas de soie avec un autre chiffon acrylique. Nous approchons ce bas frotté du deuxième pendule neutre. Il est attiré par le bas, le touche, puis en est repoussé, figure 5.2 (b). Nous retirons le bas et le pendule revient à la verticale.

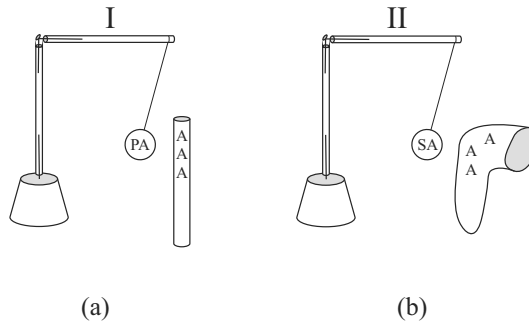


FIG. 5.2 : Après le contact, les pendules sont repoussés par les objets qui les ont touchés.

Nous approchons maintenant lentement la soie frottée du premier pendule, sans les laisser entrer en contact. Nous notons une forte attraction entre eux, figure 5.3 (a)! Lorsque nous approchons lentement la paille frottée du deuxième pendule, sans les laisser entrer en contact, une autre forte attraction se produit, figure 5.3 (b).

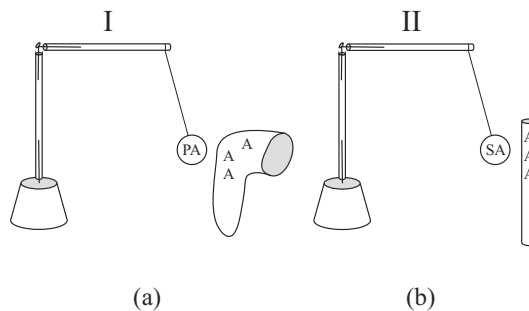


FIG. 5.3 : (a) Le premier pendule, chargé par contact avec un plastique frotté avec un tissu acrylique, est attiré par un bas de soie frotté avec un tissu acrylique. (b) Le deuxième pendule, chargé par contact avec un bas frotté avec un tissu acrylique, est attiré par une paille en plastique frottée avec un tissu acrylique.

Expérience 5.2

Le verre est réchauffé et frotté avec un chiffon en acrylique. La partie frottée du verre est déplacée lentement près du premier pendule, qui a été chargé par contact avec la paille dans l'expérience 5.1, et le verre et le disque en papier du pendule ne doivent pas entrer en contact. Nous observons une forte attraction entre le verre frotté et le pendule chargé, figure 5.4 (a). D'autre part, lorsque la partie frottée du verre est lentement approchée du deuxième pendule, qui a été chargé par contact avec le bas de soie dans l'expérience 5.1 (sans contact entre le verre et le disque en papier du pendule), nous observons qu'ils se repoussent mutuellement, figure 5.4 (b). Nous en concluons donc que le verre chargé agit de la même manière que le bas chargé et non comme la paille chargée.

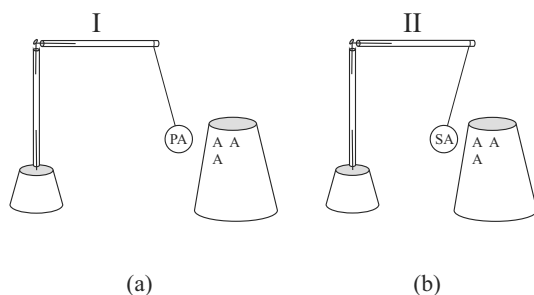


FIG. 5.4 : (a) Le premier pendule, chargé par contact avec un plastique frotté avec un chiffon acrylique, est attiré par un verre frotté avec un chiffon acrylique. (b) Le deuxième pendule, chargé par contact avec un bas de soie frotté avec un chiffon acrylique, est repoussé par un verre frotté avec un chiffon acrylique.

Expérience 5.3

Nous frottons la règle en acrylique avec le chiffon en acrylique, puis nous approchons lentement la règle du premier pendule, qui a été chargé par contact avec la paille frottée avec le chiffon en acrylique, en empêchant tout contact entre la règle et le pendule. Nous observons qu'ils se repoussent mutuellement, figure 5.5 (a). En revanche, lorsque la règle frottée est lentement approchée du deuxième pendule, qui a été chargé par contact avec le bas de soie frotté avec le chiffon acrylique, ils sont fortement attirés l'un vers l'autre, figure 5.5 (b). Nous en concluons donc que la règle chargée agit de la même manière que la paille chargée et non comme le bas chargé ou le verre chargé.

L'ordre de cette expérience peut être inversé et le résultat sera le même. Par exemple, nous déchargeons les pendules, frottons la règle en acrylique avec un chiffon en acrylique et cette règle charge le premier pendule par contact. La tasse en verre est chauffée, puis frottée avec un chiffon en acrylique et elle charge le deuxième pendule par contact. Lorsque la règle (ou la paille) frottée avec un chiffon en acrylique est lentement approchée du premier pendule, sans contact, il en résulte une répulsion. Lorsque cette règle (ou cette paille) est lentement approchée du deuxième pendule,

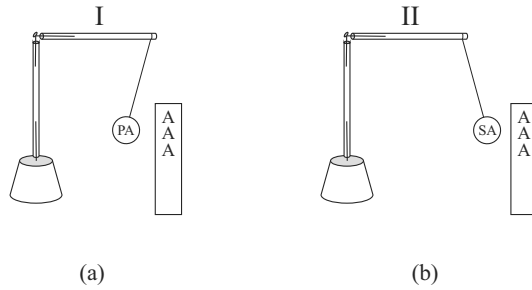


FIG. 5.5 : (a) Le premier pendule, chargé par contact avec un plastique frotté avec un chiffon acrylique, est repoussé par une règle acrylique frottée avec un chiffon acrylique. (b) En revanche, le deuxième pendule, chargé par contact avec un bas de soie frotté avec un chiffon acrylique, est attiré par une règle acrylique frottée avec un chiffon acrylique.

toujours sans contact, il en résulte une attraction. En revanche, lorsque nous approchons lentement le verre (ou la soie) frotté avec un chiffon en acrylique du premier pendule chargé, sans contact, il en résulte une forte attraction. En approchant lentement le verre (ou la soie) frotté avec un chiffon en acrylique du deuxième pendule chargé, sans contact, il en résulte une répulsion.

Ces expériences peuvent être répétées avec d'autres matériaux donnant des résultats similaires. Il y a toujours des attractions ou des répulsions entre les corps chargés par frottement et les pendules chargés par contact. Et les corps chargés peuvent être divisés en deux groupes distincts. Dans notre exemple, le premier groupe est composé de la paille en plastique frottée avec un chiffon acrylique, de la règle acrylique frottée avec un chiffon acrylique, du pendule électrique chargé par contact avec une paille frottée avec un chiffon acrylique ou avec une règle frottée avec un chiffon acrylique. Le deuxième groupe est composé du verre frotté avec un chiffon acrylique, du bas de soie frotté avec un chiffon acrylique, du pendule électrique chargé par contact avec le verre frotté avec un chiffon acrylique ou avec le bas de soie frotté avec un chiffon acrylique.

Observations expérimentales : On observe ce qui suit : les objets du premier groupe se repoussent mutuellement ; les objets du deuxième groupe se repoussent mutuellement, et les objets des différents groupes s'attirent mutuellement.

Définitions : Les objets du premier groupe sont dits « chargés négativement », « négatifs », ou nous disons qu'ils ont acquis une « charge négative ». Les objets du deuxième groupe sont dits « chargés positivement », « positifs », ou nous disons qu'ils ont acquis une « charge positive ». Dans les figures suivantes, nous représentons cette convention par les symboles « - » et « + », respectivement.

Il existe des répulsions entre les corps ayant des charges de même signe dans les figures 5.2 (a) et (b), 5.4 (b) et 5.5 (a). Il existe des attractions entre les corps chargés de charges opposées dans les figures 5.3 (a) et (b), 5.4 (a) et 5.5 (b).

Expérience 5.4

Les attractions décrites dans l'expérience 5.1 sont différentes des attractions qui se produisent entre un pendule chargé et un corps neutre. Afin de vérifier ce fait, nous répétons la première partie de l'expérience, en chargeant le pendule *I* négativement par contact avec une paille en plastique négative (frottée avec un chiffon en acrylique), et en chargeant le pendule *II* positivement par contact avec un bas en soie positif (frotté avec un chiffon en acrylique). Lorsque nous approchons lentement la paille frottée du pendule *II*, sans les laisser entrer en contact, nous observons une attraction beaucoup plus forte que celle qui se produit entre ce pendule et une paille neutre.

L'intensité de la force peut être mesurée à l'aide de trois grandeurs, à savoir (a) la distance minimale, (b) l'angle d'inclinaison pour une distance fixe entre la paille et la verticale passant par le point d'appui du fil du pendule, et (c) l'angle d'inclinaison pour une distance fixe entre la paille et le disque du pendule.

(a) La première quantité est la distance minimale à laquelle l'attraction commence à être détectée, comme le montre le mouvement initial du pendule dû à l'approche de la paille. Cette distance minimale est plus grande pour l'attraction entre des corps de charges opposées que pour l'attraction entre un corps chargé et un corps neutre. (b) La deuxième quantité est l'angle d'inclinaison d'un pendule par rapport à la verticale pour la même distance entre le corps et la verticale passant par le point d'appui du fil du pendule. Une fois de plus, nous observons que cet angle est plus grand pour l'attraction entre des corps de charges opposées que l'angle pour l'attraction entre un corps chargé et un corps neutre. (c) La troisième quantité est l'angle d'inclinaison du pendule par rapport à la verticale, en considérant la même distance entre le disque et la paille. Cet angle est plus grand pour l'attraction entre des corps de charges opposées que l'angle pour l'attraction entre un corps chargé et un corps neutre, figure 5.6. Ces trois grandeurs montrent que cette force d'attraction est clairement beaucoup plus grande entre des corps de charges opposées qu'entre un corps chargé et un corps neutre. Nous en concluons donc que l'intensité dépend du fait que l'objet approché du pendule soit neutre ou chargé.

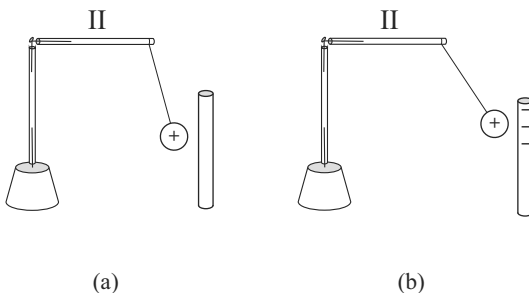


FIG. 5.6 : (a) L'attraction entre un pendule positif et une paille neutre est plus faible que l'attraction entre un pendule positif et une paille négative (b).

De même, lorsque nous approchons lentement le bas frotté du pendule chargé négativement *I*, sans les laisser entrer en contact, nous observons une attraction plus

forte entre eux que l'attraction entre un bas neutre et le pendule chargé négativement I , figure 5.7.

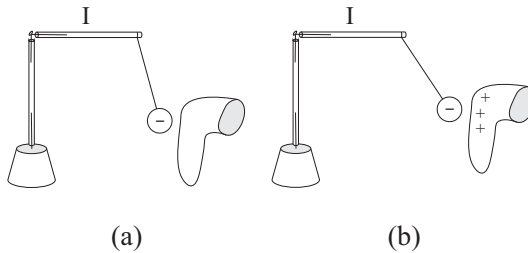


FIG. 5.7 : (a) L'attraction entre un bas neutre et un pendule négatif est plus faible que l'attraction entre un pendule négatif et un bas positif (b).

Expérience 5.5

Il est également possible d'observer une autre distinction entre les corps neutres et les corps chargés. Supposons que le pendule I soit chargé négativement et que le pendule II soit chargé positivement, comme dans l'expérience 5.1. Il y a une répulsion lorsqu'un corps chargé négativement est lentement approché du pendule I , tandis qu'il y a une attraction lorsque ce corps est lentement approché du pendule II , voir la figure 5.8 (a). Le contraire se produit lorsqu'un corps chargé positivement est lentement approché de ces pendules. En revanche, il y a une attraction lorsque nous déplaçons un corps neutre près du pendule I ou du pendule II . Voir la figure 5.8 (b). Parfois, cette attraction est si faible qu'il est difficile de la détecter.

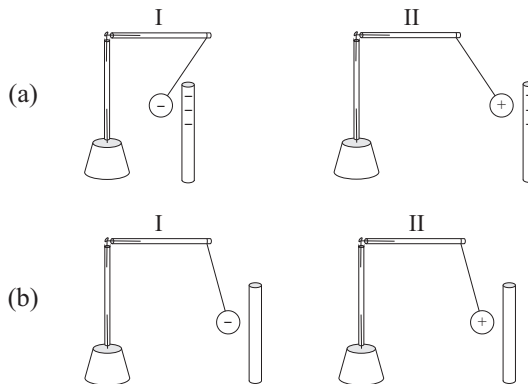


FIG. 5.8 : (a) Un corps négatif (la paille frottée) repousse fortement un autre corps négatif (le disque en papier du pendule I) et attire fortement un corps positif (le disque en papier du pendule II). (b) Un corps neutre (la paille non frottée) attire les corps négatifs et positifs (les disques en papier des pendules I et II). De plus, l'intensité de ces forces dans les cas (a) est supérieure à celle observée dans les cas (b).

Expérience 5.6

Nous allons maintenant réaliser quelques expériences analogues à l'expérience 4.4. Elles sont plus faciles à réaliser à deux. Elles nécessitent deux pailles en plastique, deux chiffons en acrylique (voir l'expérience 5.1) et deux morceaux (quelques brins chaque) de coton. Chaque petit morceau de coton doit mettre environ 10 secondes pour tomber de 2 mètres dans l'air. Des graines de pissenlit peuvent également être utilisées à la place de morceaux de coton. Les deux pailles doivent être bien frottées avec un chiffon en acrylique afin qu'elles deviennent chargées négativement. Chaque personne tient une paille à l'horizontale par l'une de ses extrémités. De l'autre main, chaque personne lâche le coton un peu au-dessus de sa paille. Le coton est attiré par la paille et y adhère. Mais les fils sont alors repoussés vers l'extérieur, repoussés par la paille. Parfois, le coton rebondit vers le haut et commence à tomber dans l'air. Lorsque cela ne se produit pas, il faut souffler doucement sur le coton jusqu'à ce qu'il se détache de la paille. On peut alors le maintenir en suspension dans l'air en déplaçant continuellement la paille frottée sous le coton, car celui-ci est repoussé par la paille. Dans cette situation, le coton et la paille sont chargés négativement.

La nouvelle expérience peut maintenant commencer. Les deux personnes maintiennent leurs morceaux de coton flottant dans l'air au-dessus de leurs pailles frottées. Elles doivent maintenant essayer de diriger leurs morceaux de coton l'un vers l'autre, en essayant de les mettre en contact dans l'air. Cependant, ils ne se touchent jamais, quels que soient leurs efforts. Ils ne se rapprochent jamais assez pour entrer en contact. Il est facile de comprendre ce fait en utilisant le principe *ACR* de Du Fay. Chaque morceau de coton flottant est repoussé par la paille située en dessous, car ils ont tous deux des charges de même signe (négatif dans ce cas). Comme les deux morceaux de coton sont chargés négativement, ils se repoussent mutuellement. Par conséquent, nous ne pouvons pas les faire se toucher, quels que soient nos efforts, figure 5.9.

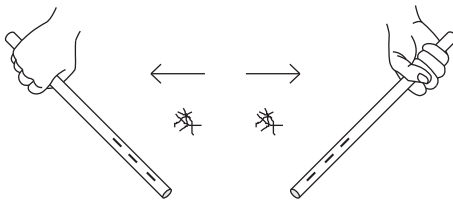


FIG. 5.9 : Il n'est pas possible de joindre deux morceaux de coton chargés négativement.

Expérience 5.7

Dans cette expérience, nous utilisons à nouveau deux pailles en plastique qui ont été chargées négativement en les frottant avec un chiffon en acrylique, comme dans l'expérience 5.6. Mais cette fois-ci, nous n'utilisons qu'un seul morceau de coton. Au départ, nous pouvons faire flotter le coton au-dessus de la paille qui a été frottée avec un chiffon en acrylique, grâce au mécanisme *ACR*, comme dans l'expérience 4.4. À ce

moment, nous approchons la deuxième paille négative horizontalement près du coton flottant. Nous observons que le coton s'éloigne de cette deuxième paille, car il est également repoussé, figure 5.10.

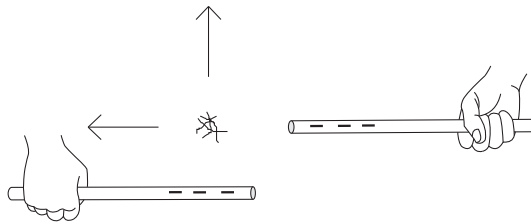


FIG. 5.10 : Forces électriques agissant sur un morceau de coton chargé négativement.

Expérience 5.8

Nous répétons l'expérience 5.7, en maintenant initialement le morceau de coton négatif flottant au-dessus d'une paille en plastique chargée négativement. Cette fois-ci, nous approchons latéralement un verre chargé positivement (c'est-à-dire préalablement réchauffé et frotté avec un chiffon en acrylique) du morceau de coton. Dans ce cas, le morceau de coton est attiré par le verre frotté et se déplace vers lui, figure 5.11. Il est préférable de s'approcher lentement, en évitant tout contact entre le coton et le verre, afin d'empêcher le morceau de coton de se charger à nouveau par le mécanisme ACR, cette fois de manière positive.

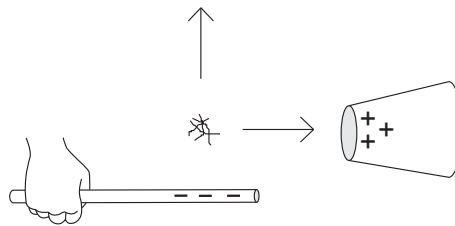


FIG. 5.11 : Un morceau de coton chargé négativement est attiré par un morceau de verre chargé positivement.

Expérience 5.9

Nous utilisons maintenant un morceau de coton, deux chiffons en acrylique, une paille en plastique et un verre. Cette expérience doit être réalisée par deux personnes. Cependant, avec un peu d'entraînement, une seule personne peut également la réaliser. La paille et le verre seront frottés avec un chiffon en acrylique. Nous savons que dans ce cas, la paille deviendra négative et le verre positif. Pour créer une forte charge sur le verre, il est important de le réchauffer avant de le frotter, comme mentionné précédemment.

Le début de cette activité est identique à l'expérience 4.4. Autrement dit, nous frottons le verre contre le chiffon en acrylique et nous tenons le verre par sa partie non frottée. Le morceau de coton est lâché au-dessus. Le coton est attiré par la partie frottée du verre, le touche, et ses fibres s'étirent alors vers l'extérieur. Parfois, le coton saute loin du verre après quelques secondes. Si cela ne se produit pas, nous pouvons à nouveau souffler légèrement sur le coton jusqu'à ce qu'il se détache du verre. Si nous plaçons le verre sous le coton, nous pouvons maintenir le coton en suspension au-dessus du verre. Parfois, cela ne se produit pas immédiatement, de sorte qu'il est attiré une ou plusieurs fois par le verre jusqu'à ce qu'il acquière une charge suffisante pour rester en suspension au-dessus de celui-ci. Plus le verre est électrisé, plus vite il maintiendra le morceau de coton flottant au-dessus de lui. À partir de maintenant, nous supposons que cette partie de l'expérience est terminée. Dans ce cas, le verre et le coton flottant au-dessus de lui sont tous deux chargés positivement, figure 5.12 (a).

Pendant que le coton flotte au-dessus du verre frotté, nous approchons lentement une paille en plastique chargée négativement du coton, en l'approchant par le haut. Dans ce cas, on observe que le coton est attiré par la paille, contrairement à ce qui s'est passé dans l'expérience 5.7. Idéalement, le coton ne devrait pas toucher la paille en plastique. Autrement dit, chaque fois que le coton se déplace vers la paille, celle-ci doit être éloignée de lui. Avec suffisamment de pratique, nous pouvons maintenir le coton flottant entre le verre en dessous et la paille au-dessus, figure 5.12 (b).

Dans ce cas, il est même possible de retirer le verre, de sorte que le coton continuera à flotter uniquement grâce à l'attraction de la paille chargée au-dessus de lui! Dans cette situation, nous avons l'inverse de l'expérience 4.4. Dans l'expérience 4.4, le coton négatif flottait grâce à la répulsion de la paille située en dessous. Ici, en revanche, le coton positif flotte grâce à l'attraction de la paille située au-dessus, figure 5.12 (c). Afin que le coton reste flottant sous la paille, il est important de bouger la paille constamment; elle ne peut pas rester immobile par rapport à la Terre, car il s'agit d'un équilibre instable. Lorsque la paille est très proche du coton, celui-ci se déplace rapidement vers elle et s'y colle, mettant fin à l'expérience. En revanche, si la paille se trouve à une grande distance au-dessus du coton, celui-ci commence à tomber au sol. De plus, le morceau de coton a tendance à se déplacer d'un côté ou de l'autre du plan vertical passant par la paille. Il est donc nécessaire de maintenir la paille en mouvement constant, de manière à ce que le morceau de coton puisse suivre son mouvement, mais sans la toucher.

Lorsque le coton touche la paille supérieure, il y adhère. Parfois, il tombe après quelques secondes. Nous pouvons alors le maintenir en suspension au-dessus de la paille, car il a de nouveau acquis une charge de même signe que celle de la paille. Dans d'autres cas, il ne se détachera de la paille que lorsque nous soufflerons dessus. Dans tous les cas, lorsqu'il flotte à nouveau au-dessus de la paille, nous pouvons inverser la situation. Lorsque nous approchons un verre positif du coton négatif par le haut, le coton reste en suspension entre les deux corps : la paille négative en dessous et le verre positif au-dessus.

Dans l'expérience 5.16, nous verrons comment réaliser cette expérience plus facilement à l'aide de deux pailles en plastique électrisées.

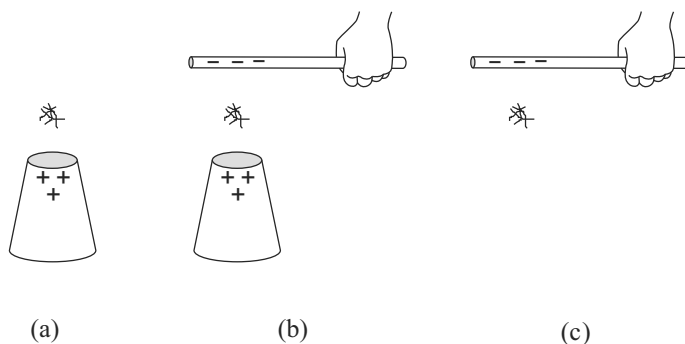


FIG. 5.12 : (a) Un morceau de coton positif peut flotter au-dessus d'un verre positif. (b) Il peut également flotter entre un verre positif en dessous et une paille négative au-dessus. (c) Nous pouvons retirer le verre et maintenir le morceau de coton flottant sous la paille négative.

Expérience 5.10

Dans cette expérience, nous avons besoin de deux personnes, d'une paille en plastique, d'un verre, de deux chiffons en acrylique et de deux petits morceaux de coton. Une personne frotte le verre avec un chiffon en acrylique, puis maintient l'autre morceau de coton en suspension au-dessus. Dans ce cas, les deux corps sont chargés positivement, figure 5.13 (a). L'autre personne frotte la paille avec un chiffon en acrylique, puis maintient un morceau de coton flottant au-dessus. Dans ce cas, les deux objets sont chargés négativement, figure 5.13 (b).

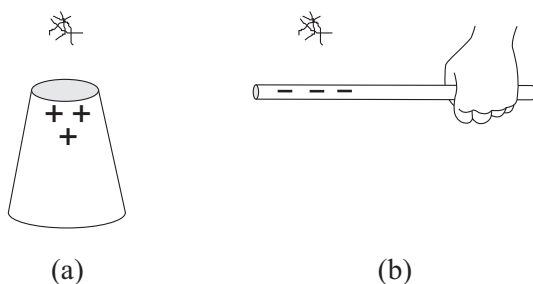


FIG. 5.13 : (a) Un morceau de coton positif flotte au-dessus d'un verre positif. (b) Un morceau de coton négatif flotte au-dessus d'un plastique chargé négativement.

Après cela, chaque personne essaie de diriger son morceau de coton vers l'autre morceau de coton. Dans ce cas, les deux morceaux de coton s'attirent, se collent l'un à l'autre et tombent au sol, figure 5.14. C'est le contraire de ce qui s'est passé dans l'expérience 5.6.

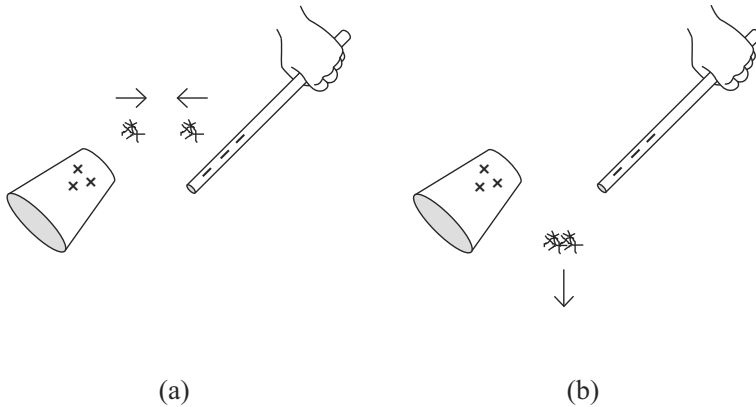


FIG. 5.14 : (a) Un morceau de coton positif est attiré par un morceau négatif. (b) Après s'être touchés, ils tombent ensemble sur le sol.

5.2 Du Fay découvre deux types d'électricité

Le premier à avoir proposé l'existence de deux types d'électricité fut Du Fay en 1733, lorsqu'il réalisa des expériences similaires à celles qui viennent d'être présentées. Jusqu'alors, on savait que les corps électrisés attiraient les corps légers et étaient attirés par eux. Du Fay avait remarqué une autre régularité, à savoir la répulsion entre deux corps chargés. Il s'agissait là d'une autre propriété des corps chargés, telle que décrite dans la section 4.1. Il avait également découvert le mécanisme *ACR*, c'est-à-dire attraction-communication (ou contact)-répulsion. Sa découverte de deux types d'électricité était tout à fait inattendue. Elle est le résultat d'une expérience curieuse qui a donné un résultat totalement contraire à ses attentes. Il a commencé par reproduire les expériences avec une plume flottante réalisées par Guericke, Gray et Hawksbee. Voir l'expérience 4.4. Au départ, il a électrisé un tube de verre par friction. Il a ensuite libéré de petites feuilles d'or minces au-dessus du tube frotté. Elles ont été attirées par le tube, se sont collées à lui, puis ont été repoussées par lui. De cette façon, elles sont restées en suspension au-dessus de lui. Nous citons maintenant ses mots décrivant le moment crucial de sa grande découverte (c'est nous qui soulignons en italique) :¹

[...] Il demeure donc pour constant, que les corps devenus électriques par communication [c'est-à-dire, par le mécanisme *ACR*], sont chassés par ceux qui les ont rendus électriques; mais le sont-ils de même par les autres corps électriques de tous les genres? & les corps électriques ne différent-ils entre-eux que par les divers degrés d'électricité? *cet examen m'a conduit à une autre vérité que je n'aurais jamais soupçonnée, & dont je crois que personne n'a encore eu la moindre idée.*

J'ai commencé par soutenir en l'air avec le même tube, deux feuilles d'or [électrisées par le mécanisme *ACR*], & elles se sont toujours éloignées l'une de l'autre, quelques efforts que j'aye faits pour les rapprocher, & cela devoit arriver de la

¹[DF33b, pp. 464–465] et [RR57, p. 586].

sorte, puisque elles étoient toutes deux électriques ; mais si-tôt que l'une des deux avoit touché la main ou quelque autre corps, elles se joignoient sur le champ l'une à l'autre, parce que celle-ci ayant [touché la main et] perdu son électricité, l'autre [feuille électrisée] l'attiroit & tendoit vers elle [Une illustration de cette expérience figure à la figure 5.15] : tout cela s'accordoit parfaitement avec mon hypothèse, *mais ce qui me déconcerta prodigieusement*, fut l'expérience suivante.

Ayant élevé en l'air une feuille d'or par le moyen du tube [en verre électrisé], j'en approchai un morceau de gomme copal² frottée, & renduë électrique, la feuille fut s'y appliquer sur le champ [c'est-à-dire que la feuille d'or étoit attirée par la gomme copal frottée], & y demeura [Une illustration de cette expérience figure à la figure 5.16] ; *j'avouë que je m'attendois à un effet tout contraire*, parce que selon mon raisonnement, la copal qui étoit électrique devoit repousser la feuille qui l'étoit aussi [c'est-à-dire, Du Fay s'attendait à une répulsion entre les deux corps électrisés, comme il l'avait toujours observé] ; je répétai l'expérience un grand nombre de fois, croyant que je ne présentois pas à la feuille l'endroit [de la copal] qui avoit été frotté, & qu'ainsi elle ne s'y portoit que comme elle auroit fait à mon doigt, ou à tout autre corps [non électrisé], mais ayant pris sur cela mes mesures, de façon à ne me laisser aucun doute, je fus bien convaincu que la copal attiroit la feuille d'or, quoiqu'elle fût repoussée par le tube : la même chose arrivoit en approchant de la feuille d'or un morceau d'ambre [frotté], ou de cire d'Espagne frotté.

Après plusieurs autres tentatives qui ne me satisfaisoient aucunement, j'approchai de la feuille d'or chassée par le tube, une boule de cristal de roche frottée & renduë électrique, elle [la balle] repoussa cette feuille de même que le tube. Un autre tube [en verre électrisé] que je fis présenter à la même feuille la chassa de même, enfin je ne pus pas douter que le verre & le cristal de roche, ne fissent précisément le contraire de la gomme copal, de l'ambre & de la cire d'Espagne, ensorte que la feuille repoussée par les uns [le premier groupe frotté], à cause de l'électricité qu'elle avoit contractée, étoit attirée par les autres [le second groupe frotté] ; *cela me fit penser qu'il y avoit peut-être deux genres d'électricité différents*, & je fus bien confirmé dans cette idée par les expériences suivantes.

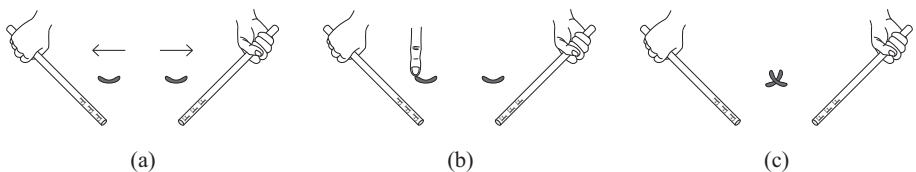


FIG. 5.15 : (a) Deux feuilles d'or électrisées se repoussent mutuellement et repoussent également les tubes de verre électrisés. (b) La main touche l'une des feuilles flottantes. (c) Après le contact avec la main, les feuilles se rapprochent l'une de l'autre.

Comme la plupart des substances du premier groupe qu'il a rencontrées étoient solides et transparentes comme du verre, il a nommé le premier type d'électricité « électricité vitreuse ». Et comme la plupart des substances du deuxième groupe qu'il a

²Voir l'annexe A.

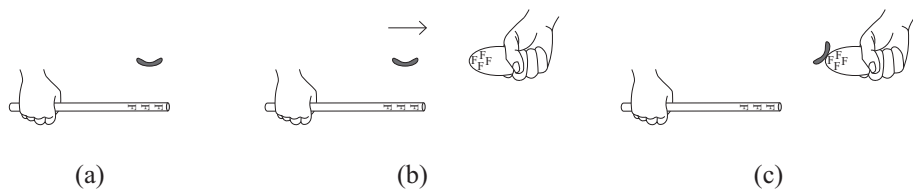


FIG. 5.16 : (a) Une feuille d'or électrisée flotte au-dessus d'un verre frotté. (b) Un morceau de copal frotté se déplace près de la feuille flottante. La feuille est attirée par le copal frotté, la flèche indiquant cette nouvelle force qui s'exerce sur elle. (c) La feuille se déplace vers le copal frotté!

trouvées étaient bitumineuses ou résineuses, il a appelé ce deuxième type d'électricité « électricité résineuse » :³

Voilà donc constamment deux électricités d'une nature toute différente, sçavoir, celle des corps transparents & solides, comme le verre, le cristal, &c. & celle des corps bitumineux ou résineux, comme l'ambre, la gomme copal, la cire d'Espagne, etc. Les uns & les autres repoussent les corps qui ont contracté une électricité de même nature que la leur, & ils attirent, au contraire, ceux dont l'électricité est d'une nature différente de la leur. [...]

Voilà donc deux électricités bien démontrées, & je ne puis me dispenser de leur donner des noms différents pour éviter la confusion des termes, ou l'embarras de définir à chaque instant celle dont je voudrai parler; j'appellerai donc l'une l'*électricité vitrée*, & l'autre l'*électricité résineuse*, non que je pense qu'il n'y a que les corps de la nature du verre qui soient doués de l'une, & les matières résineuses de l'autre, car j'ai déjà de fortes preuves du [point de vue] contraire, mais c'est parce que le verre & la copal sont les deux matières qui m'ont donné lieu de découvrir ces deux différentes électricités.

Du Fay n'a pas précisé quel matériau il a utilisé pour frotter le tube de verre et les autres substances. Il a probablement frotté ces substances avec un chiffon en laine, en soie ou en coton.

Dans un ouvrage légèrement plus tardif, il a décrit cette découverte fortuite dans les termes suivants :^{4,5}

³[DF33b, pp. 467,469].

⁴[DF34a, pp. 263–264].

⁵Chance has thrown in my way another Principle, more universal and remarkable than the preceding one [the ACR mechanism, see Section 4.8], and which casts a new Light on the Subject of Electricity. This Principle is, that there are two distinct Electricities, very different from one another; one of which I call *vitreous Electricity*, and the other *resinous Electricity*. The first [electricity] is that of [rubbed] Glass, Rock-Crystal, Precious Stones, Hair of Animals, Wool, and many other Bodies. The second is that of [rubbed] Amber, Copal, Gum-Lack, Silk, Thread, Paper, and a vast Number of other Substances. The Characteristic of these two Electricities is, that a Body of the *vitreous Electricity*, for Example, repels all such as are of the same Electricity; and on the contrary, attracts all those of the *resinous Electricity*; so that the [glass] Tube, made electrical [by rubbing], will repel Glass, Crystal, Hair of Animals, &c. when render'd electrick [by rubbing or by the ACR mechanism by getting in touch with the rubbed glass tube] and will attract Silk, Thread, Paper, &c. though render'd electrical likewise [by rubbing or by the ACR mechanism by getting in touch with a rubbed copal]. [Rubbed] Amber on the contrary will attract electrick Glass, and other

Le hasard m'a mis sur le chemin d'un autre principe, plus universel et plus remarquable que le précédent [le mécanisme *ACR*, voir section 4.8], qui jette un nouvel éclairage sur le sujet de l'électricité. Ce principe est qu'il existe deux électricités distinctes, très différentes l'une de l'autre; l'une que j'appelle « électricité vitreuse » et l'autre « électricité résineuse ». La première [électricité] est celle, [après frottement] du verre, du cristal de roche, des pierres précieuses, des poils d'animaux, de la laine et de nombreux autres corps. La seconde est celle [après frottement] de l'ambre, du copal, de la gomme laque, de la soie, du fil, du papier et d'un grand nombre d'autres substances. La caractéristique de ces deux électricités est qu'un corps chargé d'« électricité vitreuse », par exemple, repousse tous ceux qui sont chargés de la même électricité et, au contraire, attire tous ceux qui sont chargés d'« électricité résineuse »; ainsi, le tube de verre, rendu électrique [par frottement], repoussera le verre, le cristal, les poils d'animaux, etc. lorsqu'il est rendu électrique [par frottement ou par le mécanisme *ACR* en entrant en contact avec le tube de verre frotté] et attirera la soie, le fil, le papier, etc., bien que rendu électrique de la même manière [par frottement ou par le mécanisme *ACR* en entrant en contact avec un copal frotté]. Au contraire, l'ambre [frotté] attirera le verre électrique et d'autres substances [électrisées] de la même classe, et repoussera la gomme laque [frottée], le copal, la soie, le fil, etc. Deux rubans de soie rendus électriques [par frottement] se repousseront mutuellement; deux fils de laine [électrisés] feront de même; mais un fil de laine [frotté] et un fil de soie [frotté] s'attireront mutuellement. Ce principe explique très naturellement pourquoi les extrémités des fils de soie ou de laine s'écartent les unes des autres en formant un crayon ou un balai lorsqu'elles ont acquis une qualité électrique. À partir de ce principe, on peut facilement déduire l'explication d'un grand nombre d'autres « phénomènes ». Et il est probable que cette vérité nous conduira à la découverte de nombreuses autres choses.

Comme nous le verrons plus loin, nous n'utilisons plus la terminologie de Du Fay. Au lieu des termes « électricité vitreuse » et « électricité résineuse », nous utilisons respectivement « électricité positive » et « électricité négative ». D'autres expressions similaires utilisées aujourd'hui sont « charges électriques positives et négatives » ou « corps chargés positivement et négativement ». Malgré cette terminologie différente, l'hypothèse fondamentale de Du Fay concernant l'existence de deux types d'électricité est toujours acceptée. Dans la pratique moderne, il est également toujours admis que les charges de même nature se repoussent, tandis que les charges de nature différente s'attirent.

Une vidéo très intéressante montrant une reproduction moderne de l'expérience cruciale de Du Fay a été réalisée par Blondel et Wolff,⁶ « La danse des feuilles d'or ».

[electrified] Substances of the same Class, and will repel [rubbed] Gum-Lac, Copal, Silk, Thread, &c. Two Silk Ribbons rendered electrical [by rubbing], will repel each other; two [electrified] Woollen Threads will do the like; but a [rubbed] Woollen Thread and a [rubbed] Silk Thread will mutually attract one another. This Principle very naturally explains, why the Ends of Threads, of Silk, or Wool, recede from one another in Form of a Pencil or Broom, when they have acquired an electrick Quality. From this Principle one may with the same Ease deduce the Explanation of a great Number of other *Phenomena*. And 'tis probable, that this Truth will lead us to the further Discovery of many other things.

⁶[BW20] et [BW12].

5.3 Quel type de charge un corps acquiert-il par frottement ?

Dans les expériences du chapitre 2, nous avons analysé quelles substances étaient ou n'étaient pas attirées par un objet frotté. Nous avons également découvert que certaines substances frottées avaient le pouvoir d'attirer des corps légers. Ici, nous allons varier de manière plus systématique la substance avec laquelle les objets sont frottés.

Nous utiliserons un instrument très pratique composé d'une fine bande de plastique souple fixée à un support horizontal (comme un crayon, un stylo, une brochette ou une paille). La bande peut mesurer, par exemple, 5 cm de large et 15 cm de long. L'une de ses extrémités est fixée à un crayon à l'aide de ruban adhésif. Le crayon est maintenu à l'horizontale et la bande à la verticale. La figure 5.17 montre un instrument de ce type, de profil et de face. Par analogie avec le fil pendulaire de Gray de la section 4.9, nous pouvons appeler cet instrument un « fil pendulaire en plastique » ou une « bande pendulaire en plastique ».

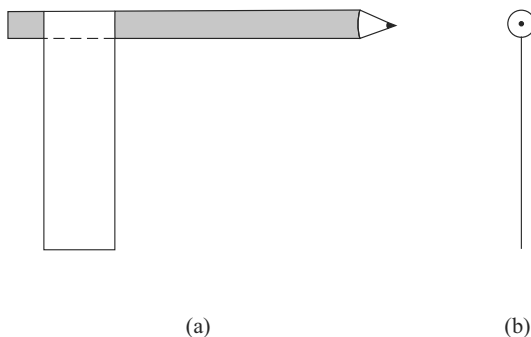


FIG. 5.17 : Une fine bande de plastique souple reliée à un crayon. (a) Vue de profil. (b) Vue de face.

Plusieurs de ces instruments peuvent être fabriqués à partir du même matériau plastique (par exemple, toutes les bandes peuvent être découpées dans le même sac en plastique). Il faut éviter de manipuler les bandes afin qu'elles ne se chargent pas par frottement. Avant de commencer les expériences avec ces instruments, il faut vérifier qu'ils sont bien neutres. Nous déchargeons d'abord un versorium métallique en le touchant avec notre doigt. Nous approchons ensuite lentement chaque bande de plastique pendante du versorium, sans les laisser se toucher. Si le versorium ne s'oriente pas vers la bande, nous pouvons considérer que le plastique est neutre. Lorsque le versorium s'oriente vers la bande, ce plastique doit être jeté et nous devons fabriquer un autre instrument pour le remplacer.

Expérience 5.11

Nous frottons deux de ces morceaux de plastique neutres avec nos doigts, en pressant la bande entre l'index et le majeur, puis en déplaçant rapidement les doigts vers

le bas le long du plastique. Ensuite, nous approchons un crayon horizontal latéralement près de l'autre. Les crayons peuvent même se toucher. Nous observons que les bandes se repoussent mutuellement en raison de leur répulsion réciproque. S'il n'y avait pas de répulsion, elles resteraient verticalement côte à côte. Ceci est analogue à l'expérience 4.1.

Nous prenons maintenant deux autres bandes de plastique neutres pendantes. Nous les frottons en pressant chaque bande entre deux tubes neutres en PVC, comme des tuyaux d'eau. Pour ce faire, nous vérifions d'abord si ces tubes sont vraiment neutres. Cela peut être fait en approchant chaque tube d'un versorium métallique et en observant que le versorium n'est pas orienté par le tube en PVC. La partie supérieure de la bande de plastique est bien comprimée entre deux de ces tubes en PVC neutres. Nous tirons ensuite rapidement le crayon avec sa bande vers le haut. Nous pouvons vérifier que la bande s'est chargée après cette procédure en l'approchant d'un versorium, qui se tourne alors vers le plastique frotté. Cette procédure de frottement doit être répétée avec la deuxième bande de plastique pendulaire neutre. Nous rapprochons maintenant ces deux bandes qui ont été frottées avec des tubes en PVC. Une fois de plus, elles se repoussent.

Il y a aussi une répulsion entre deux bandes de plastique, initialement neutres, qui ont été frottées avec des cheveux. Il en va de même pour deux bandes neutres après avoir été frottées entre deux tubes en caoutchouc dur.⁷

Ces quatre cas de répulsion sont représentés dans la figure 5.18.

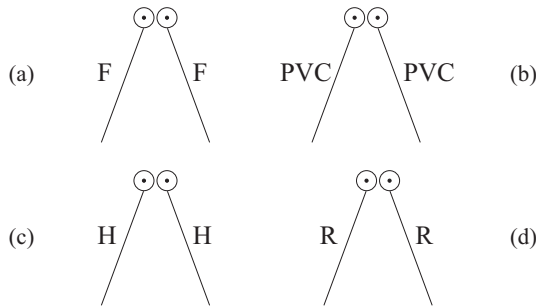


FIG. 5.18 : Repoussements entre deux bandes de plastique frottées entre deux doigts (*F*), entre deux tubes en *PVC*, avec des cheveux (*H*) ou entre deux tuyaux en caoutchouc (*R*).

Expérience 5.12

Nous prenons maintenant l'une des bandes de plastique qui ont été frottées entre des doigts. Nous l'approchons d'une autre bande de plastique qui a été frottée avec des tubes en PVC. Nous observons qu'elles s'attirent mutuellement.

⁷Comme indiqué dans le volume 2 de cet ouvrage, ce que j'ai appelé « caoutchouc dur » ou « tuyau en caoutchouc » dans le volume 1 de cet ouvrage (un tuyau ou tube flexible blanc couramment utilisé au Brésil pour raccorder les douches électriques) est fabriqué en PVC ou en PTFE, c'est-à-dire un tuyau ou tube en polychlorure de vinyle ou en polytétrafluoroéthylène, [Ass18a], [Ass18b] et [Ass19].

Il y a également attraction lorsque nous approchons une bande de plastique frottée entre des doigts d'une autre bande de plastique qui a été frottée entre des tuyaux en plastique en caoutchouc.⁸ Il en va de même entre un plastique frotté avec des cheveux et un plastique qui a été frotté entre des tubes en PVC ; ou entre un plastique qui a été frotté avec des cheveux et un plastique frotté entre des tuyaux en caoutchouc.

Ces quatre cas d'attraction sont représentés dans la figure 5.19.

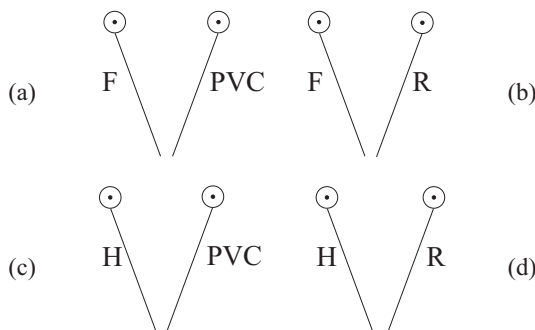


FIG. 5.19 : Quatre cas d'attraction entre deux bandes de plastique frottées avec différentes substances. (a) Doigt et PVC. (b) Doigt et caoutchouc. (c) Cheveux et PVC. (d) Cheveux et caoutchouc.

Expérience 5.13

D'autre part, il existe une répulsion entre un plastique qui a été frotté entre nos doigts et un autre plastique frotté avec des cheveux. Il en va de même entre un plastique frotté entre des tubes en PVC et un autre frotté entre des tuyaux en caoutchouc, figure 5.20.

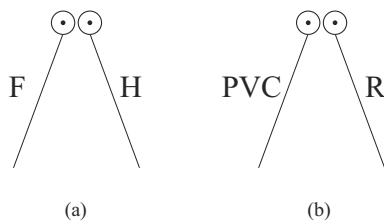


FIG. 5.20 : Répulsion entre deux bandes de plastique frottées avec différentes substances. (a) Doigts et cheveux. (b) PVC et caoutchouc.

Ces expériences montrent qu'une seule et même substance, dans notre cas une bande de plastique, peut être chargée négativement ou positivement, selon le matériau avec lequel elle est frottée. Cela semble confirmer la théorie de Du Fay selon

⁸Voir note de bas de page 7.

laquelle il existe deux types d'électricité. En revanche, son hypothèse selon laquelle chaque type d'électricité est associé à un groupe spécifique de substances n'est pas valable. Au lieu de parler d'électricité vitreuse et résineuse, comme le suggère Du Fay, nous adoptons la terminologie des « charges positives » et « charges négatives ». Dans l'expérience 5.1, nous avons séparé les corps chargés en deux groupes distincts. Dans notre exemple, le premier groupe était composé d'une paille en plastique frottée avec un chiffon en acrylique, d'une règle en acrylique frottée avec un chiffon en acrylique, d'un pendule chargé par contact avec cette paille en plastique et d'un pendule chargé par contact avec cette règle en acrylique frottée. Dans notre exemple, le deuxième groupe était composé d'un verre frotté avec un chiffon en acrylique, d'un bas en soie frotté avec un chiffon en acrylique, d'un pendule chargé par contact avec ce verre frotté et d'un pendule chargé par contact avec cette soie frottée. On a observé que les objets du premier groupe se repoussaient mutuellement, que les objets du deuxième groupe se repoussaient mutuellement et qu'un objet du premier groupe attirait un objet du deuxième groupe.

Convention : La convention actuelle est que les objets du premier groupe sont devenus « chargés négativement », ou ont acquis une « charge négative ». On dit également que les objets du deuxième groupe sont devenus « chargés positivement », ou ont acquis une « charge positive ».

Du Fay lui-même a essayé de déterminer si le type d'électricité acquis par un objet pouvait dépendre du matériau avec lequel il était frotté.⁹ Afin de tester cette influence, il a frotté un tissu de soie chauffé d'abord avec ses mains, puis avec un autre tissu de soie chauffé. Il a vérifié que la soie frottée acquérait la même électricité résineuse dans les deux cas. Il a également frotté de la laine et des plumes avec ses mains et avec de la soie. Dans les deux cas, il a constaté que la laine et les plumes acquéraient la même électricité vitreuse. Après ces quelques tests, il a conclu que le matériau avec lequel nous frottons un corps pouvait modifier la quantité d'électricité acquise par le corps, mais pas le type d'électricité acquis. Plus tard, cette conclusion a dû être modifiée lorsqu'on a découvert que le même corps pouvait acquérir les deux types de charge électrique, selon le matériau avec lequel il était frotté. Il n'est donc plus logique de parler d'« électricité vitreuse » ou d'« électricité résineuse », puisque le verre lui-même, par exemple, peut acquérir les deux types d'électricité, selon la substance avec laquelle il est frotté.

Définitions : De nos jours, on parle d'« électricité positive et négative » ou de « charges positives et négatives ». De plus, il est d'usage d'appeler « négative » la charge acquise par une paille en plastique frottée avec des cheveux, de la peau, du coton ou de la soie. De même, la charge acquise par une paille en plastique frottée avec du caoutchouc dur, un tube acrylique ou du PVC est appelée « positive ».

⁹[DF33b, pp. 472–473].

Expérience 5.14

Afin de déterminer quelles charges ont été acquises par les plastiques frottés dans l'expérience 5.11, nous réalisons une expérience qui commence de manière très similaire à l'expérience 5.1. Un pendule électrique *I* est chargé négativement par contact avec une paille en plastique chargée par frottement avec un tissu acrylique. Un pendule électrique *II* est chargé positivement par contact avec un bas en soie chargé par frottement avec un tissu acrylique. Nous plaçons ces deux pendules à une bonne distance l'un de l'autre. La paille frottée et le bas frotté sont retirés de la table. Les fils des deux pendules chargés pendent verticalement. Nous frottons une bande de plastique pendante avec nos doigts. Nous approchons lentement ce plastique frotté du pendule *I*, sans les laisser entrer en contact. Nous observons que le pendule est repoussé par le plastique, figure 5.21 (a). Après cette procédure, nous approchons lentement ce plastique frotté du pendule *II*, sans les laisser entrer en contact. Nous observons une attraction entre eux, figure 5.21 (b). Nous en concluons donc que le plastique que nous avons frotté avec nos doigts est devenu chargé négativement.

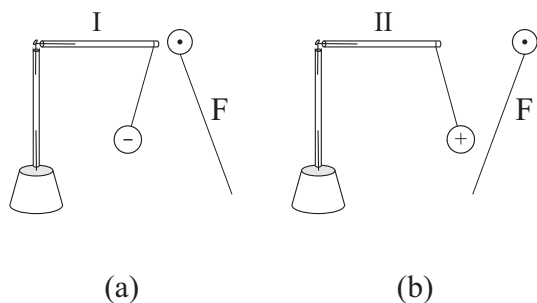


FIG. 5.21 : Procédure de Du Fay pour déterminer le signe de la charge d'un corps électrisé. Dans cet exemple, le plastique frotté est repoussé par un pendule chargé négativement, (a), et attiré par un pendule chargé positivement, (b). Nous en concluons donc que le plastique est chargé négativement.

En répétant cette expérience avec d'autres bandes de plastique frottées avec différentes substances, nous observons qu'elles se chargent comme suit : entre des doigts (négativement), entre des tubes en PVC (positivement), avec des cheveux (négativement), entre des tuyaux en caoutchouc dur (positivement).

Voici la procédure permettant de déterminer le type de charge qu'un corps a acquis en frottant contre une certaine substance. Essentiellement, nous devons savoir à l'avance qu'un corps *I* est chargé négativement et qu'un corps *II* est chargé positivement. Nous approchons ensuite le corps test chargé du corps *I* et également du corps *II*. Lorsque le corps test est repoussé par *I* et attiré par *II*, on dit qu'il a une charge négative. Lorsqu'il est attiré par *I* et repoussé par *II*, on dit qu'il a une charge positive. Cette procédure est due à Du Fay, bien qu'il ait utilisé les concepts d'électricité vitreuse et résineuse, au lieu de nos électricités positive et négative.¹⁰

¹⁰[DF33b, pp. 469–470].

Pour juger donc quelle est l'espece d'électricité d'un corps quelconque, il n'y a qu'à le rendre électrique, & lui présenter l'un après l'autre un morceau de verre & un morceau d'ambre, il sera certainement attiré par l'un, & repoussé par l'autre ; [...]

Cette procédure sera effectuée de manière plus systématique dans la section 5.4.

Expérience 5.15

Nous savons désormais que toute substance peut devenir chargée positivement ou négativement, selon la substance utilisée pour la frotter. Nous pouvons ainsi répéter l'expérience 5.1 de manière plus pratique, obtenant ainsi des résultats plus visibles.

Une paille en plastique acquiert une bonne quantité de charge négative lorsqu'elle est frottée avec des cheveux, de la peau ou du coton. Par essais et erreurs, on constate qu'elle acquiert une bonne quantité de charge positive lorsqu'elle est frottée entre deux tuyaux en caoutchouc dur. Pour charger la paille, nous coupons deux morceaux de tuyau. Nous plaçons une extrémité de la paille entre ces morceaux bien comprimés et la retirons rapidement des tuyaux. Une paille en plastique acquiert également une bonne quantité de charge positive lorsqu'elle est frottée de cette manière entre deux tubes en PVC.

Nous chargeons le disque en papier du pendule *I* à l'aide du mécanisme ACR par contact avec une paille en plastique frottée avec des cheveux. Après le contact, ce pendule est repoussé par cette paille. Nous chargeons le disque en papier du pendule *II* par contact avec une paille en plastique frottée entre deux tuyaux en caoutchouc dur. Après le contact, ce pendule est repoussé par cette paille.

Cependant, lorsque nous approchons lentement cette dernière paille frottée du pendule *I*, sans les laisser entrer en contact, il y a une attraction entre eux. De même, lorsque nous approchons lentement la première paille frottée du pendule *II*, sans les laisser entrer en contact, il y a une attraction entre eux.

L'avantage de cette procédure par rapport à celle adoptée dans l'expérience 5.1 est qu'il est plus facile et plus pratique d'acquérir une bonne quantité de charge positive avec une paille en plastique frottée entre deux tuyaux en caoutchouc dur qu'avec un verre (ou un tissu en soie) frotté contre un tissu en acrylique. En particulier, il est difficile d'électriser les verres modernes par friction tout en tenant le verre dans la main.

Expérience 5.16

L'expérience 5.9 peut être reproduite plus facilement en utilisant deux pailles en plastique frottées avec des matériaux différents (car un même objet frotté avec des matériaux différents acquiert des charges différentes), plutôt qu'une paille et un verre frottés avec le même matériau. Nous utilisons également une graine de pissenlit ou un morceau de coton qui met environ 10 secondes pour tomber d'une hauteur de 2 mètres. Nous frottons une paille dans des cheveux pour la charger négativement. Nous frottons une autre paille entre deux tuyaux en caoutchouc dur pour la charger positivement, comme dans l'expérience 5.15. Ces deux pailles sont tenues horizontalement mais séparées l'une de l'autre.

La graine de pissenlit est lâchée au-dessus de la paille négative. Elle est attirée par la paille, la touche, puis en est repoussée (si elle ne s'éloigne pas immédiatement de la

paille, nous pouvons souffler doucement dessus). La graine de pissenlit acquiert une charge négative par le mécanisme ACR. Elle peut alors rester en suspension au-dessus de la paille, comme dans l'expérience 4.4, figure 5.22 (a).

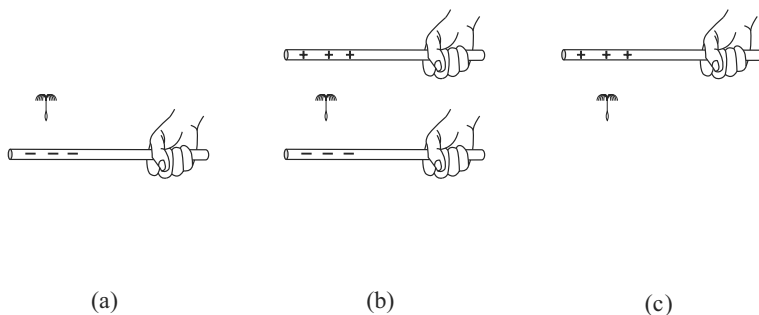


FIG. 5.22 : (a) Une graine de pissenlit négative flottant au-dessus d'une paille négative. (b) La graine de pissenlit négative flottant entre une paille négative et une paille positive. (c) La graine de pissenlit négative flottant sous une paille positive.

Nous amenons maintenant lentement la paille positive au-dessus de la graine de pissenlit. La deuxième paille doit toujours rester au-dessus de la graine de pissenlit, sans la toucher. Dans ce cas, il y aura une attraction entre la graine de pissenlit négative et la deuxième paille positive. La graine de pissenlit négative peut rester en suspension entre la paille négative inférieure et la paille positive supérieure, comme dans la figure 5.22 (b). Ce résultat ne peut être obtenu qu'en évitant tout contact entre la graine de pissenlit négative et la paille positive située au-dessus.

Il est possible de retirer la paille négative inférieure et de maintenir la graine de pissenlit négative en suspension dans l'air sous la paille positive, à condition qu'elles ne se touchent pas, figure 5.22 (c). Avec de la pratique, on acquiert une bonne maîtrise de cette expérience. Chaque fois que la graine de pissenlit négative se déplace vers la paille positive supérieure, nous devons retirer rapidement la paille, mais en la maintenant toujours au-dessus de la graine de pissenlit. De cette façon, la graine de pissenlit peut rester en suspension sous la paille, tout en oscillant de haut en bas sous celle-ci.

Expérience 5.17

L'expérience 5.15 peut également être réalisée à l'aide du versorium de Du Fay, section 4.7. Nous construisons deux de ces versoria, *I* et *II*, en vérifiant toujours qu'ils sont bien déchargés après leur construction. Rappelez-vous l'utilisation d'une feuille d'aluminium à l'extrémité d'une des pattes de chaque versorium de Du Fay.

Au départ, nous frottons une paille en plastique dans des cheveux pour la charger négativement. Nous chargeons ensuite le versorium *I* par le mécanisme ACR, comme décrit dans l'expérience 4.12. Une fois que la feuille d'aluminium est libérée de la paille négative, elle est repoussée par celle-ci. Nous frottons une autre paille entre deux tuyaux en caoutchouc dur afin de la charger positivement. Nous chargeons le versorium *II* positivement par contact avec cette paille. Une fois que la feuille

d'aluminium se détache de cette paille, elle en est repoussée.

Nous approchons maintenant lentement la paille négative du versorium *II*, sans les laisser entrer en contact. Nous observons que la feuille d'aluminium est attirée par la paille. Nous approchons lentement la paille positive du versorium *I*, sans les laisser entrer en contact. Nous observons que la feuille d'aluminium est également attirée par cette paille.

Expérience 5.18

L'expérience 5.14 peut également être réalisée avec deux versoria de Du Fay. La feuille d'aluminium du versorium *I* est chargée négativement par le mécanisme *ACR*, comme dans l'expérience 5.17. Selon la même procédure, la feuille d'aluminium du versorium *II* est chargée positivement. Une autre paille en plastique est frottée contre une certaine substance. Après cette procédure, nous approchons la partie frottée de cette paille du versorium négatif *I*, sans permettre aux deux d'entrer en contact. Supposons qu'ils se repoussent, comme dans la figure 5.23.

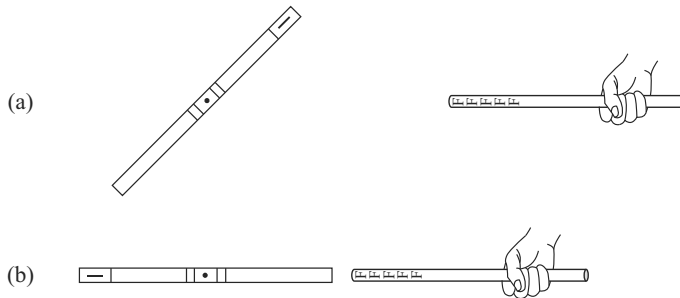


FIG. 5.23 : Feuille d'aluminium chargée négativement d'un versorium de Du Fay repoussée par un corps électrisé qui s'en approche.

Nous déplaçons maintenant la partie frottée de cette paille près du versorium positif *II*, sans les laisser entrer en contact. Supposons qu'ils s'attirent, comme dans la figure 5.24. Comme les charges identiques se repoussent et que les charges opposées s'attirent, nous en concluons dans ce cas que la paille est devenue chargée négativement par frottement. La même procédure peut être utilisée pour déterminer le signe de la charge sur d'autres matériaux électrisés par frottement contre différentes substances.

Du Fay a créé ce type de versorium comme un instrument pratique et sensible permettant de déterminer le type d'électricité acquise par des objets qui en absorbent très peu. Au départ, il a construit un versorium en métal, mais il s'est ensuite rendu compte que, pour ses besoins, il serait préférable d'utiliser des versoria en verre ou en cire. Il a ensuite décrit une expérience analogue à l'expérience 5.18 :¹¹

¹¹[DF33b, pp. 473–474].

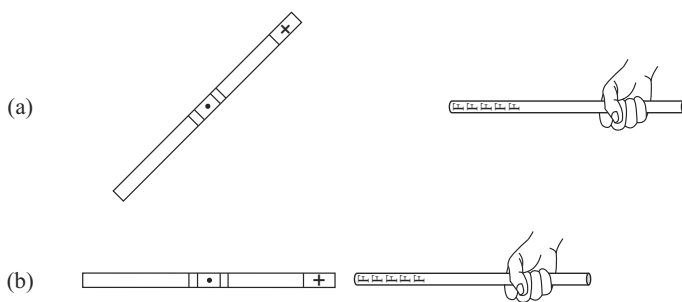


FIG. 5.24 : Feuille d'aluminium chargée positivement d'un versorium de Du Fay attirée par un corps électrisé approché d'elle.

Il y a encore un moyen bien simple pour connoître le genre d'électricité d'un corps dans lequel cette vertu est très-foible, [...] J'épargnerai cependant au lecteur un détail ennuyeux & rebutant d'expériences manquées ou imparfaites, & je dirai seulement que pour réussir, il faut se servir d'une aiguille de verre posée sur un pivot de verre très-long, que cette aiguille porte à l'un de ses bouts une boule de métal creuse, & à l'autre un contre-poids de verre, qu'il faut bien sécher toutes ces pièces, & qu'alors il faut communiquer l'électricité à la boule de métal avec le tube, ou quelqu'autre matière analogue, la boule sera alors attirée par les corps dont l'électricité est résineuse, & repoussée par ceux qui ont l'électricité vitrée.

5.4 La série triboélectrique

Dans cette expérience, nous illustrons comment la procédure pratique de l'expérience 5.14 peut être utilisée avec une grande variété de substances frottées contre différents matériaux. Un versorium métallique sera utilisé pour tester si le corps est neutre ou chargé. Au départ, nous touchons le versorium avec notre doigt afin de le décharger. Nous approchons ensuite lentement le corps du versorium, sans le toucher. Lorsque le versorium reste immobile, sans s'orienter vers le corps, nous disons que le corps est neutre. Lorsque le versorium s'oriente vers le corps, nous disons que le corps est chargé.

Afin de tester la charge acquise par les corps frottés, nous utilisons deux pendules électriques chargés d'électricité opposée. Ces deux pendules sont placés à bonne distance l'un de l'autre sur la table. Avant de charger les pendules, nous touchons le disque en papier de chacun d'eux avec notre doigt. Nous les chargeons ensuite par contact. Une procédure simple et efficace consiste à frotter une paille en plastique et à l'approcher de l'un des pendules. Le disque en papier est attiré par la paille frottée, la touche, puis en est repoussé, car il acquiert une charge de même signe.

D'après notre expérience avec ce type d'expérience, nous savons qu'il est facile de charger un pendule négativement. Après tout, une paille en plastique acquiert une grande quantité de charge négative en étant frottée contre plusieurs substances : cheveux, coton, papier, etc. Il existe d'autres corps qui acquièrent également une bonne quantité d'électricité négative (la substance avec laquelle ils sont frottés entre

parenthèses) : tube acrylique (feuille de papier, coton, tissu acrylique, cheveux, polyamide synthétique), tuyau en caoutchouc dur (sac en plastique, tissu acrylique, polyamide synthétique, cheveux, verre), tube en PVC (peau humaine, tissu acrylique, polyamide synthétique, verre), polystyrène (cheveux), sac en plastique (cheveux) et soie (cheveux).

Il est plus difficile de trouver des substances appropriées qui acquièrent une grande quantité d'électricité positive par frottement. Afin de charger une paille en plastique avec une grande quantité de charge positive, nous avons dû la frotter entre deux tuyaux en caoutchouc dur (ou entre deux tubes en PVC), en la tirant rapidement entre les tuyaux comprimés. D'autres objets acquièrent également une bonne quantité de charge positive (la substance avec laquelle ils sont frottés est indiquée entre parenthèses) : le verre (tissu acrylique), le polyamide synthétique (tissu acrylique) et la soie (tissu acrylique, tuyaux en caoutchouc dur, tubes en acrylique et tubes en PVC).

Afin de charger certaines substances ayant la forme d'un fil ou d'un fil métallique (cheveux, fil de coton, fil de polyamide synthétique et fil de polyester), nous avons utilisé la procédure suivante. Ils ont d'abord été attachés à une paille en plastique afin d'éviter qu'ils ne se déchargent à travers notre main après le frottement, figure 5.25 (a). Pour tester la charge acquise par ces fils frottés, nous n'avons pas utilisé les pendules chargés décrits précédemment. Plutôt, nous avons placé sur des supports appropriés une paille chargée négativement (frottée avec des cheveux sur toute sa longueur) et une paille chargée positivement (frottée entre deux tuyaux en caoutchouc dur sur toute sa longueur). Le support peut être identique au support du pendule, figure 5.25 (b).

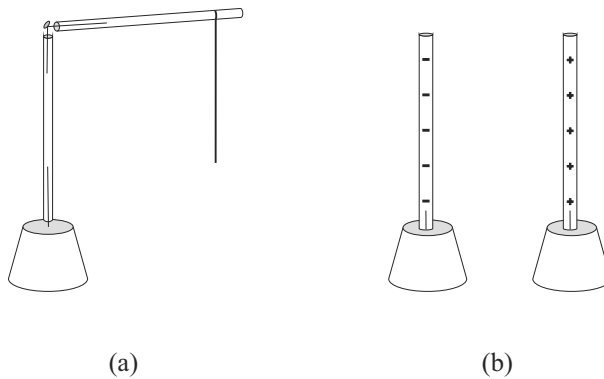


FIG. 5.25 : (a) Fil attaché à une paille en plastique. (b) Pailles en plastique polarisées de manière opposée.

Le fil frotté, attaché à une paille horizontale, a ensuite été déplacé lentement près de la paille verticale chargée négativement, sans la toucher. Il a ensuite été déplacé lentement près de la paille verticale chargée positivement, sans la toucher. En observant l'attraction et la répulsion de ce fil par rapport à ces pailles chargées, nous pouvons déterminer la charge acquise par frottement dans ce fil.

Les objets testés étaient les suivants : peau humaine sèche, sac en plastique, papier

de soie, polystyrène, feuille d'aluminium, coton, tissu acrylique (voir l'expérience 5.1), polyamide synthétique, cheveux, cuir, laine d'acier, liège, verre lisse, tuyau en caoutchouc dur, paille en plastique, porcelaine, tube acrylique, tube en PVC, carton fin, bois et soie. Nous avons frotté certaines substances avec du coton hydrophile ou frotté un fil de coton contre d'autres corps. Le polyamide synthétique a été utilisé sous la forme d'un bas pour femme pour frotter certaines substances. Certains bas dits « en soie » sont en fait fabriqués en polyamide synthétique. Le polyamide synthétique est également facile à trouver dans les maillots de bain. Nous avons frotté différents objets dans des cheveux, mais nous avons également utilisé un seul cheveu humain attaché à une paille en plastique et l'avons frotté contre d'autres substances. Le bois utilisé dans nos expériences provenait de brochettes à barbecue vendues dans le commerce. Nous ne savons pas exactement de quel type d'arbre provenait ce bois. Nous avons utilisé un tissu en soie pour frotter certaines substances. Nous avons également utilisé un fil de soie, que nous avons frotté contre d'autres objets. Le verre utilisé ici était très lisse.

La procédure adoptée dans la plupart des cas était la suivante. Un pendule était chargé négativement en touchant une paille frottée avec des cheveux. Un autre pendule était chargé positivement par contact avec une paille frottée entre deux tuyaux en caoutchouc dur. Ces pendules chargés étaient séparés spatialement de manière à ce que leurs fils pendent verticalement. Les pailles frottées étaient également séparées spatialement et maintenues verticalement par des supports appropriés, afin de tester la charge acquise par certains fils frottés.

Nous avons d'abord vérifié si certains objets *I* et *II* étaient initialement déchargés en les approchant chacun d'un versorium. Si tel était le cas, l'objet *I* était alors frotté contre l'objet *II*. L'idée était de pouvoir faire varier les deux objets *I* et *II* afin de déterminer la charge produite.

Après cela, nous avons vérifié si l'objet *I* avait reçu suffisamment de charge. Pour ce faire, nous l'avons lentement approché du versorium, afin de voir si celui-ci s'orientait en fonction de lui. Si c'était le cas, l'objet chargé *I* était lentement déplacé près du pendule chargé négativement, sans contact, et nous observions si le pendule était attiré ou repoussé par cet objet. L'objet *I* a ensuite été lentement approché du pendule chargé positivement, sans contact. Nous avons observé si ce deuxième pendule était attiré ou repoussé par l'objet *I*. S'il y avait une attraction (répulsion) du pendule chargé négativement, et également une répulsion (attraction) du pendule chargé positivement, nous avons conclu que l'objet *I* était devenu chargé positivement (négativement) en frottant contre l'objet *II*.

Il nous semble pertinent de vérifier si l'un des pendules a été attiré ou repoussé par l'objet chargé, et si l'autre pendule a été repoussé ou attiré par cet objet chargé. Cette précaution est nécessaire afin d'éviter tout doute quant à la charge acquise par l'objet frotté. La raison de cette précaution est que la charge acquise par frottement peut souvent être très faible. Cela crée des attractions et des répulsions de faible intensité entre cet objet frotté et les pendules chargés, ce qui rend difficile la réalisation d'observations précises.

De temps en temps, nous devons toucher le versorium avec notre doigt, afin de décharger toute électricité résiduelle qu'il pourrait acquérir. De plus, nous devons également recharger chaque pendule de temps en temps, car leur électricité diminue avec le temps. En ce qui concerne les objets en plastique ou en résine, nous ne devons

pas frotter le même objet contre plus d'une substance. La raison de cette précaution est que parfois, la charge acquise lors du premier frottement reste dans le corps en plastique ou en résine. Il est alors difficile de savoir clairement quel type d'électricité a été acquis par frottement avec la deuxième substance. Afin de tester la charge acquise par une paille en plastique, par exemple, nous devons utiliser une nouvelle paille pour chaque substance contre laquelle nous allons la frotter. De plus, avant de frotter la paille, il est toujours judicieux de vérifier si elle est vraiment neutre.

Afin de frotter la paille en plastique contre des substances dures, nous avons fixé l'une de ses extrémités entre celles-ci (entre deux morceaux de polystyrène, entre deux bouchons, etc.). Après cette procédure, nous avons rapidement retiré la paille de ces deux objets, en la déplaçant sur toute sa longueur entre eux.

Dans le cas du verre, du cuir, de la porcelaine, du bois et du papier, nous devons faire preuve d'une attention particulière avant de les manipuler avec nos mains. Ils ne peuvent acquérir et conserver une bonne charge que s'ils ont été séchés et, de préférence, réchauffés avant le frottement. Nous les avons chauffés au micro-ondes, mais il est également possible de les chauffer avec une allumette.

En général, nous avons frotté le corps *I* contre le corps *II*. Dans la mesure du possible, nous avons testé les deux charges, celle du corps *I* et celle du corps *II*. Mais cela n'a pas toujours été possible. Dans certains cas, l'un de ces corps ne conservait aucune charge générée par le frottement. Normalement, ce corps est déchargé par contact avec notre main, comme c'est le cas avec la laine d'acier, le coton ou une feuille de papier. Si tel était le cas, nous avons testé uniquement la charge conservée par l'autre corps.

Après avoir suivi ces procédures et réalisé les expériences, nous avons obtenu le résultat présenté dans le tableau 5.1.

Définition : Une liste telle que le tableau 5.1 est appelée une « série triboélectrique ». Le préfixe « tribo » vient du grec. Il signifie friction ou action de frotter. Une série triboélectrique indique les types d'électrisation obtenus par friction.

Ce tableau doit être lu comme suit : lorsque nous frottons le corps *I* 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 deviendra chargé négativement. Par exemple, lorsque la paille en plastique est frottée contre la soie, la soie deviendra positive et le plastique négatif.

Nous n'avons pas inclus la laine d'acier dans ce tableau, car il était difficile pour un corps d'acquérir une forte charge électrique en étant frotté contre elle. Les corps qui sont devenus négativement chargés étaient la paille en plastique, le tube en acrylique, le caoutchouc dur, le tube en PVC, le polystyrène et le sac en plastique. En revanche, un seul cheveu humain est devenu positivement chargé en étant frotté contre de la laine d'acier. Le verre, le bois, la porcelaine, le tissu acrylique, le polyamide synthétique et la soie n'ont pas acquis de charge perceptible.

Cette série triboélectrique ne coïncide pas avec d'autres séries triboélectriques trouvées dans la littérature. Il est également courant de trouver dans la littérature deux ou plusieurs séries triboélectriques différentes les unes des autres, même en incluant

TAB. 5.1 : 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 PVC
caoutchouc dur
-

les mêmes corps dans un ordre différent. Il existe de bonnes raisons à cette divergence de résultats. Il existe de nombreux types de verre, fabriqués à partir de matériaux différents et selon des procédés de fabrication variés. Ces aspects ont certainement une incidence sur leur capacité à acquérir des charges positives ou négatives par frottement. Par exemple, certains types de verre se sont chargés positivement après avoir été frottés dans notre main, tandis que d'autres se sont chargés négativement. La même diversité de matériaux et de procédés de fabrication existe pour d'autres substances (plastique, papier, caoutchouc, etc.). Les colorants utilisés dans la soie et dans d'autres tissus ou fils peuvent également influencer leurs propriétés. Le bois provenant de différents arbres peut avoir des propriétés différentes. Les cheveux et la peau humains peuvent être plus ou moins gras, et peuvent également être imprégnés de shampoings, de crèmes et d'autres substances.

Toute personne qui réalise ces expériences devrait essayer de construire sa propre série triboélectrique, en utilisant les matériaux disponibles.

Dans la section 5.3, nous avons vu comment, en 1733, Du Fay avait frotté de la soie, des plumes et de la laine contre de la soie et contre sa main. Il a constaté que chacun de ces corps était toujours chargé d'électricité du même type, quel que soit le matériau contre lequel il était frotté. Depuis lors, certaines anomalies ont été détectées. John Canton (1712–1772), en particulier, a découvert que le verre rugueux (non poli)

pouvait être chargé positivement en le frottant avec de la flanelle, ou négativement en le frottant avec de la soie huilée.¹² Ces recherches ont été poursuivies par Johan Carl Wilcke (1732–1796), qui a publié en 1757 la première série triboélectrique, à savoir :¹³ verre lisse, laine, plumes, bois, papier, cire à cacheter, cire blanche, verre rugueux, plomb, soufre et métaux autres que le plomb. En 1759, Benjamin Wilson (1721–1788) a publié une autre série, probablement obtenue indépendamment de Wilcke, à savoir :¹⁴ diamant, tourmaline, verre, ambre. Ce sont les premières séries triboélectriques jamais publiées.

5.5 Les attractions et les répulsions sont-elles aussi fréquentes ?

Expérience 5.19

Dans la section 5.4, nous avons vu comment charger positivement et négativement une paille en plastique. Nous chargeons l'une de ces pailles négativement par frottement et répétons l'expérience 4.10. C'est-à-dire que nous touchons d'abord le disque en papier du pendule avec notre doigt. Nous approchons ensuite la paille négative du pendule. Le disque en papier est attiré par la paille, la touche, puis en est repoussé. Lorsque nous touchons le disque en papier avec notre doigt, il se décharge. Nous pouvons alors répéter toute la procédure.

La même expérience doit être réalisée avec une paille chargée positivement. Au départ, nous déchargeons le pendule lorsque nous touchons le disque en papier avec notre doigt. Lorsque nous approchons la paille positive du disque, celui-ci est attiré par la paille, la touche, puis en est repoussé. Lorsque nous touchons le disque en papier, il se décharge. L'ensemble de la procédure peut alors être répété.

Expérience 5.20

Nous réalisons maintenant des expériences analogues aux expériences 5.1 et 5.15. Nous chargeons le pendule *I* négativement par la méthode ACR, comme dans les expériences 4.7 et 5.19. Nous chargeons le pendule *II* positivement par la méthode ACR, comme dans l'expérience 5.20. Nous approchons lentement la paille négative du pendule *I* chargé négativement, en observant la répulsion du pendule. Nous déplaçons maintenant la paille négative près du pendule *II* chargé positivement, sans les mettre en contact. Nous observons une attraction du pendule. Nous approchons lentement la paille positive du pendule *II* chargé positivement, en observant que le pendule est repoussé. Nous approchons maintenant la paille positive du pendule *I* chargé négativement, sans les mettre en contact. Le pendule est attiré par la paille.

¹²[Can53b].

¹³[Hei99, pp. 387–388].

¹⁴[Wil59] et [Hei99, pp. 387–388].

Expérience 5.21

Nous réalisons maintenant des expériences analogues à l'expérience 4.8. Un pendule est chargé négativement par la méthode ACR. Pour le charger négativement, une paille frottée avec des cheveux est approchée du pendule, comme dans les expériences 5.1 et 5.15. Une fois que le disque de papier est repoussé par la paille frottée, nous retirons la paille. Nous approchons alors lentement notre doigt du disque de papier, sans le toucher. Le pendule est attiré par le doigt.

La même procédure est répétée avec un pendule chargé positivement. Une charge positive peut être obtenue lorsque nous approchons une paille frottée entre deux tuyaux en caoutchouc dur d'un pendule neutre. Une fois que le disque de papier est repoussé par cette paille frottée, nous retirons la paille. Nous approchons alors lentement notre doigt du pendule, sans le toucher. Une fois de plus, le pendule est attiré par le doigt.

L'expérience 5.20 montre à nouveau qu'un corps chargé négativement I repousse un autre corps chargé négativement II . Il en va de même pour deux corps chargés positivement. En revanche, si le corps I est chargé négativement et le corps II chargé positivement, ils s'attirent mutuellement. Il en va de même si I est positif et II négatif.

Nous observons donc deux attractions et deux répulsions. Cela pourrait indiquer que ces deux phénomènes sont également fréquents. Cependant, comme le montrent les expériences 5.19 et 5.21, un corps chargé attire normalement un corps neutre, que le corps chargé soit positif ou négatif. Et un corps neutre comme notre doigt attire non seulement un corps positif, mais aussi un corps négatif. Cela montre que les attractions sont beaucoup plus fréquentes ou courantes que les répulsions, car la majorité des corps sont macroscopiquement neutres. Lorsque nous chargeons un certain corps, il aura tendance à attirer presque tous les corps qui l'entourent, même si cette attraction peut être de très faible intensité, difficile à détecter ou à observer. Ce corps chargé ne cherchera à repousser que les autres corps qui ont une charge nette du même signe. Si le deuxième corps a une charge de signe opposé au premier, ou si le deuxième corps est neutre, il y aura une attraction entre eux.

En conclusion, nous pouvons dire que ces expériences illustrent le fait que les attractions électriques sont beaucoup plus courantes que les répulsions électriques, car elles se produisent beaucoup plus fréquemment.

Dans la section 7.10, nous discuterons de la force d'interaction entre deux corps électrisés avec des charges de même signe.

5.6 Variation de la force électrique en fonction de la distance

Depuis la plus ancienne expérience en électrostatique, l'expérience 2.1, on sait que l'attraction exercée par un corps chargé sur un petit corps léger dépend de la distance qui les sépare. Après tout, les corps légers ne sont visiblement attirés par un corps frotté que lorsque la distance entre eux est faible. Lorsque la distance entre ces deux corps est très grande, cette attraction n'est pas facilement détectable. Il en va de même

pour les expériences avec le versorium, comme l'expérience 3.1. En effet, ce n'est que lorsque le plastique frotté est approché du versorium que celui-ci s'oriente vers le plastique. Il en va de même pour toutes les autres expériences décrites jusqu'à présent, car les effets ne se produisent que lorsque la distance entre les corps en interaction est faible.

Ces effets peuvent également être observés dans les attractions et les répulsions entre des corps chargés. Illustrons ce fait à l'aide d'un pendule électrique.

Expérience 5.22

Un pendule électrique I est chargé négativement par la méthode ACR, comme dans les expériences 5.1 et 5.15. Après cette procédure, nous retirons la paille négative qui l'a chargé par contact. Dans cette situation, le fil du pendule revient à la verticale. Nous chargeons une autre paille positivement en la frottant entre deux tuyaux en caoutchouc dur. Nous approchons lentement la paille positive du pendule négatif, sans contact, jusqu'à ce que nous puissions détecter leur attraction, comme le montre l'inclinaison du fil par rapport à la verticale. La paille horizontale doit être à la même hauteur que le disque en papier, en s'en approchant par le côté. Nous diminuons lentement la distance entre le disque en papier et l'extrémité de la paille frottée. Nous observons que la diminution de cette distance augmente l'angle d'inclinaison du fil par rapport à la verticale, figure 5.26. Cela montre que la force d'attraction entre des corps électrisés de charges opposées augmente lorsque la distance entre les corps en interaction diminue. Dans cette expérience, la force est indiquée par l'angle d'inclinaison du pendule par rapport à la verticale.

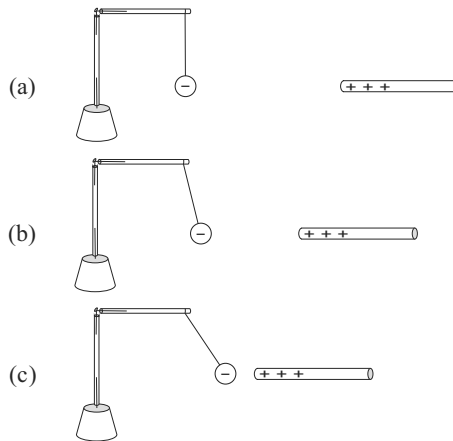


FIG. 5.26 : En réduisant la distance entre le disque de papier négatif et l'extrémité positive de la paille frottée, nous augmentons la force d'attraction entre eux.

Expérience 5.23

Un pendule électrique I est chargé négativement par la méthode *ACR*, comme dans les expériences 5.1 et 5.15. Après cette procédure, nous retirons la paille négative qui l'a chargé par contact. Dans cette situation, le fil du pendule revient à la verticale. Nous approchons maintenant lentement la paille frottée négativement du pendule chargé jusqu'à la distance à laquelle la répulsion commence à être visible, comme l'indique la déviation du pendule par rapport à la verticale. La paille doit être maintenue à l'horizontale et à la même hauteur que le disque de papier, et approchée de celui-ci par le côté. Nous diminuons ensuite lentement la distance entre le disque de papier et l'extrémité frottée de la paille. Nous observons que lorsque cette distance diminue, l'angle d'inclinaison du fil par rapport à la verticale augmente, comme le montre la figure 5.27. Cela indique une force de répulsion croissante à mesure que la distance entre les corps en interaction diminue.

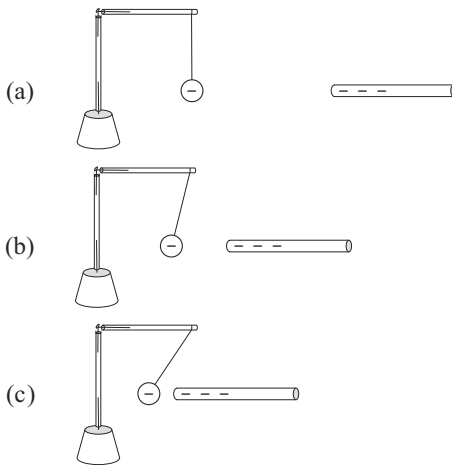


FIG. 5.27 : En réduisant la distance entre le disque de papier négatif et l'extrémité négative de la paille frottée, nous augmentons la force répulsive entre eux.

Dans cette expérience, la paille frottée ne doit pas s'approcher trop près du pendule électrisé. En effet, dans certaines situations, ils peuvent s'attirer mutuellement lorsque la distance entre eux est trop faible. Ce phénomène sera abordé dans la section 7.10.

5.7 Variation de la force électrique avec la quantité de charge

Jusqu'à présent, nous n'avons pas pris la peine de mesurer la quantité d'électricité (ou l'amplitude de la charge électrique). Normalement, cela se fait à l'aide de la notion de force électrique.

Soient A , B et C trois corps dont les tailles sont petites par rapport à la distance qui les sépare. Nous considérerons que les corps A et B sont électrisés (par

frottement ou par le mécanisme ACR). Nous appelons F_{AC} la force entre A et C lorsqu'ils sont séparés par la distance d , le corps B étant éloigné de ces deux corps. Nous appelons F_{BC} la force entre B et C lorsque ces deux corps sont séparés par la distance d , A étant éloigné de ces deux corps.

Définitions : On dit que la grandeur de la charge A est égale à la grandeur de la charge B lorsque $F_{AC} = F_{BC}$. Si F_{AC} est plus grande que F_{BC} , alors nous disons que la grandeur de la charge A est supérieure à la grandeur de la charge B . Si F_{AC} est plus petite que F_{BC} , alors nous disons que la grandeur de la charge A est inférieure à la grandeur de la charge B .

L'intensité de la force peut être mesurée de différentes manières. Ici, nous considérons des situations où les distances sont toujours les mêmes. Dans l'expérience 2.1, par exemple, plus la paille recueille de morceaux de papier, plus la force qu'elle exerce sur eux est grande. Dans l'expérience 2.8, l'intensité de la force est indiquée par la courbure du filet de liquide qui tombe. Dans l'expérience 4.1, l'intensité de la force est indiquée par l'angle d'ouverture entre les bandes de plastique électrisées. Dans les expériences avec le pendule électrique, comme dans l'expérience 4.5, l'intensité de la force est indiquée par l'angle entre le pendule et la verticale. Dans les expériences avec le fil plastique pendulaire, l'intensité de la force est indiquée par l'angle d'ouverture entre les bandes de plastique, comme dans l'expérience 5.11.

Par exemple, étant donné deux pailles en plastique électrisées A et B , nous avons défini que la paille la plus électrisée est celle qui, à égale distance de la table ou du filet de liquide, attire le plus de morceaux de papier ou provoque la plus grande courbure du liquide qui tombe, figure 5.28. Le corps C dans ce cas est un morceau de papier ou le filet d'eau. La paille la plus électrisée sera également celle qui, à égale distance d'un pendule électrique, provoque une plus grande inclinaison du pendule par rapport à la verticale. La même définition peut être appliquée aux autres expériences décrites dans cet ouvrage.

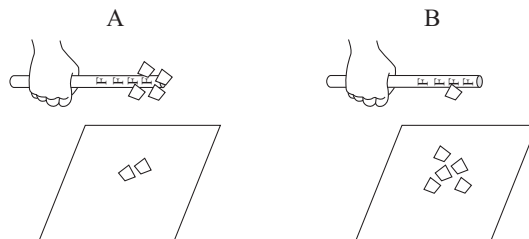


Fig. 5.28 : Les pailles A et B sont à égale distance d'une table. La paille A est plus électrisée que B car elle attire plus de morceaux de papier.

Dans la section 5.6, nous avons vu que l'intensité de la force augmente lorsque la distance entre les corps en interaction diminue. Cela suggère une autre procédure pour mesurer l'électrisation d'un corps. Nous définissons que la quantité de charge d'un corps est indiquée par la distance à laquelle sa force électrique crée des effets visibles. Par exemple, supposons que nous ayons deux pailles en plastique électrisées A et B

de même taille. Supposons que A commence à attirer des morceaux de papier à une distance de 15 cm d'une table, tandis que pour B , cette attraction ne commence qu'à une distance de 5 cm de la table. Dans ce cas, nous définissons que A est plus électrisée que B , c'est-à-dire que A a une plus grande quantité de charge électrique que B , figure 5.29.

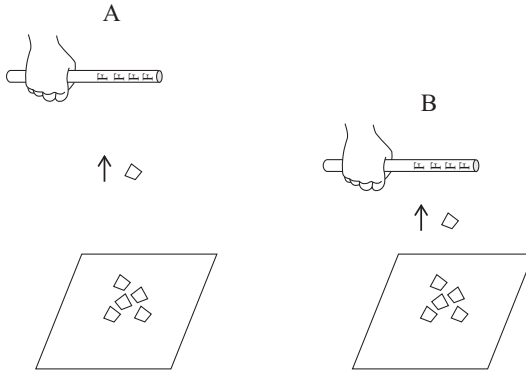


FIG. 5.29 : La paille A est plus électrisée que la paille B , car elle commence à attirer les morceaux de papier à une plus grande distance de la table.

Les autres effets commenceront également à être observés ou détectés à une plus grande distance pour A que pour B . Par exemple, considérons que le corps A provoque la courbure du filet d'eau (ou du pendule électrique) lorsqu'il se trouve à une distance d_1 de l'eau qui tombe (ou du pendule). Pour le corps B , la distance équivalente sera d_2 . Lorsque A est plus électrisé que B , alors $d_1 > d_2$.

En conclusion, par définition, la force électrique augmente avec la quantité de charge.

Nous présentons maintenant quelques expériences simples mais non triviales.

Expérience 5.24

Nous choisissons deux pailles en plastique électrisées par frottement. Nous plaçons l'une d'elles horizontalement, parallèlement à une table sur laquelle se trouvent de nombreux morceaux de papier. Supposons qu'elle attire N morceaux de papier lorsqu'elle se trouve à une distance d de la table. Supposons que la deuxième paille électrisée attire également environ N morceaux de papier lorsqu'elle se trouve à la même distance d de la table. D'après la définition précédente de la section 5.7, nous concluons qu'elles ont la même quantité de charge.

Nous éloignons ensuite les pailles de la table. Nous les joignons côte à côte, horizontalement. Nous les rapprochons ensemble de la table jusqu'à ce qu'elles se trouvent à la même distance d de la table qu'auparavant. Nous observons qu'ensemble, elles attirent un plus grand nombre de morceaux de papier que chacune d'elles séparément.

Lorsque nous joignons trois ou quatre pailles électrisées de manière égale, le nombre de morceaux de papier attirés augmente encore plus à la même distance de la table.

Expérience 5.25

Imaginons que nous ayons deux pailles en plastique qui ont été uniformément électrisées par frottement sur toutes leurs longueurs. Supposons qu'elles aient approximativement les mêmes charges électriques, comme indiqué dans la définition précédente. Nous chargeons un pendule électrique selon la méthode ACR en le laissant toucher l'une des pailles électrisées. Après cette procédure, le pendule commence à être repoussé par la paille. Nous retirons la paille et le pendule électrisé revient à la verticale. Nous plaçons la paille horizontalement à la même hauteur que le disque du pendule. Supposons que le pendule soit incliné d'un angle θ par rapport à la verticale lorsque l'extrémité la plus proche de la paille se trouve à une distance d de la projection verticale passant par le support du pendule, comme dans la figure 5.30 (a).

Nous joignons les deux pailles frottées et les amenons à la même distance d du pendule électrique chargé. Nous observons que le pendule s'écarte d'un angle supérieur à θ par rapport à la verticale, comme dans la figure 5.30 (b). Ce fait expérimental, associé à la définition précédente, montre que deux corps de charge égale, lorsqu'ils sont placés ensemble, ont une charge plus importante que chacun de ces corps pris individuellement.

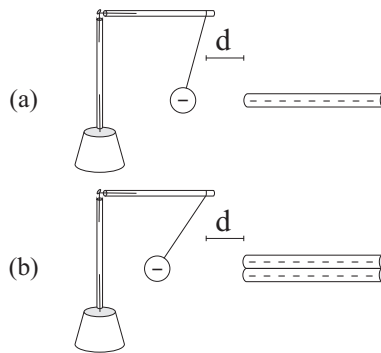


FIG. 5.30 : (a) La force exercée sur un pendule chargé par une paille chargée est inférieure à (b) la force exercée sur le même pendule par deux pailles de charge égale, situées à la même distance de la verticale passant par le point d'appui du fil.

Lorsque nous assemblons trois pailles chargées de manière égale, nous observons que l'angle d'inclinaison du pendule augmente encore davantage. Cela indique une nouvelle augmentation de la force.

Définition : Ces observations permettent une nouvelle définition. Supposons que nous ayons N corps électrisés de manière égale avec des charges de même signe. Supposons que nous réunissions ces N corps chargés en un seul ensemble. Nous définissons la quantité de charge de cet ensemble comme étant égale à N fois la quantité de charge d'un seul corps.

Bien que cette définition soit très simple, elle n'est pas triviale. Nous l'illustrons par un exemple. Le niveau d'un thermomètre à mercure peut être défini comme un

indicateur de la température d'un corps. Par exemple, nous pouvons définir que deux corps A et B ont la même température si le niveau de ce thermomètre connecté à A est égal au niveau de ce thermomètre connecté à B . Lorsque le niveau du thermomètre est plus élevé (plus bas) pour A que pour B , nous définissons alors que A a une température plus élevée (plus basse) que B . Cependant, une expérience simple montre que lorsque nous joignons les deux corps A et B , de telle sorte qu'ils se touchent, le niveau du thermomètre ne change pas. En raison d'expériences comme celle-ci, nous ne définissons pas la température d'un ensemble AB (c'est-à-dire avec A et B ensemble en contact l'un avec l'autre) comme étant le double de la température de A .

En ce qui concerne les poids et les charges électriques, de nombreuses expériences montrent que lorsque nous réunissons N corps ayant la même propriété, les effets gravitationnels et électriques produits par ces N corps seront supérieurs à l'effet produit par un seul de ces corps. Des expériences comme celles-ci conduisent à la définition précédente. En d'autres termes, des expériences comme celles-ci rendent la définition précédente raisonnable.

Expérience 5.26

Nous attachons les extrémités de deux morceaux de paille en plastique de même longueur et de même poids à l'aide d'un petit fil de soie. Nous pouvons fabriquer deux ou trois ensembles de ce type. Nous frottons chaque ensemble dans des cheveux, mais dans certains ensembles, cette friction est plus rapide et plus intense. Lorsque nous approchons chacun de ces ensembles d'un pendule chargé négativement, nous constatons que chacun d'entre eux incline le pendule selon un angle différent, même lorsqu'ils se trouvent tous à la même distance de la verticale passant par le point d'appui du fil du pendule. Cela nous indique que chaque système possède une quantité de charge électrique différente, figure 5.31.

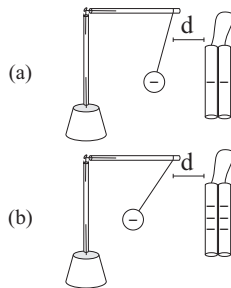


FIG. 5.31 : Corps ayant des charges différentes. Les plastiques en (b) ont une charge électrique plus importante que les plastiques en (a).

Chaque système peut alors être suspendu à un support horizontal (comme un crayon) à l'aide du fil de soie. Nous observons que les pailles ne restent pas verticales, mais se repoussent les unes les autres. De plus, le système qui a repoussé le pendule chargé avec le plus de force est également celui pour lequel les deux morceaux de paille s'inclinent le plus par rapport à la verticale, figure 5.32. Comme les pailles de

tous les systèmes ont le même poids, cela montre une fois de plus qu'en augmentant la charge qu'elles contiennent, nous augmentons la force électrique entre elles.

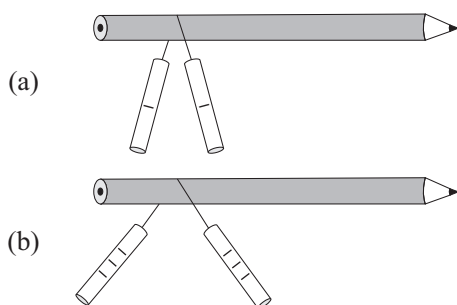


FIG. 5.32 : En augmentant la quantité de charge dans chaque paire de pailles, nous augmentons la force entre les pailles chargées de chaque paire.

Chapitre 6

Les conducteurs et les isolants

6.1 L'électroscope

Nous avons déjà construit un versorium et un pendule électrique. Nous allons maintenant construire un autre instrument, l'électroscope. Il en existe plusieurs variétés, dont nous ne présenterons ici que quelques-unes. Le versorium et le pendule électrique sont parfois également appelés électroscopes, car ils indiquent la présence de corps chargés à proximité. Mais dans cet ouvrage, nous réserverons le nom « électroscope » à l'instrument décrit dans cette section, et nous aborderons également les propriétés qui le distinguent des instruments précédents.

Le modèle le plus simple est peut-être celui en carton fin. Nous découpons un rectangle de 7 cm sur 10 cm, avec le côté le plus long à la verticale, figures 6.1 et 6.2. Nous fixons le rectangle à une paille en plastique à l'aide de deux morceaux de ruban adhésif. Le ruban doit être appliqué au dos du rectangle, sans dépasser des bords. L'extrémité supérieure de la paille doit rester proche du bord supérieur du rectangle, sans le dépasser.

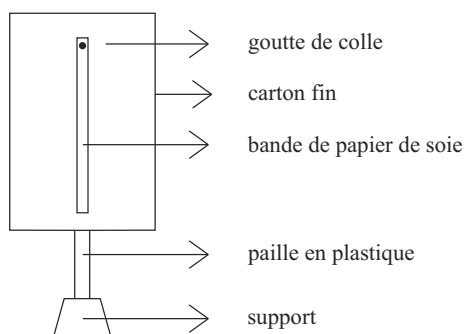


FIG. 6.1 : Électroscope vu de face.

Nous découpons une très petite bande de papier de soie, d'environ 1 à 3 mm de large et 6 à 9 cm de long. Les effets décrits dans ce chapitre sont plus visibles lorsque

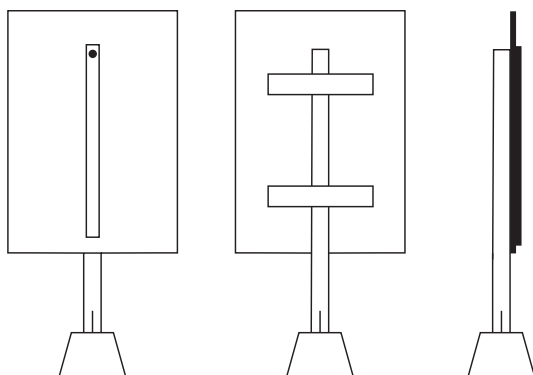


FIG. 6.2 : (a) Électroscope vu de face. (b) Vue arrière. (c) Vu de profil.

l'on utilise une bande très fine et légère. Ce papier de soie peut être celui utilisé pour fabriquer des cerfs-volants ou pour emballer des cadeaux fragiles. Nous collons 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, nous pouvons également la fixer avec un petit morceau de ruban adhésif, à condition que celui-ci ne dépasse pas le bord du rectangle.

Nous préparons un support pour l'électroscope, tel que celui présenté dans la section 4.4. *L'aspect crucial de l'électroscope est qu'il doit être muni d'une paille en plastique comme support pour le carton.* Autrement dit, le carton ne doit pas être fixé, par exemple, à une brochette en bois ou en métal. La paille en plastique est ensuite placée sur l'attache-papier du support. Si le rectangle ne reste pas dans un plan vertical, nous pouvons assembler deux pailles, l'une à l'intérieur de l'autre, afin de le rendre plus rigide. Dans la section 6.5, nous présenterons les composants fondamentaux d'un électroscope comme celui-ci, après son utilisation pour réaliser plusieurs expériences.

Il existe également plusieurs autres modèles d'électroscopes. Nous pouvons recouvrir le carton rectangulaire fin de feuille d'aluminium et, à la place du papier de soie, nous pouvons également utiliser de la feuille d'aluminium. De plus, au lieu de coller le papier de soie ou de le fixer avec du ruban adhésif, nous pouvons également utiliser un petit crochet métallique fixé au rectangle. Nous faisons ensuite un petit trou avec une épingle dans la partie supérieure de la bande et nous la fixons au crochet. Les rectangles peuvent également avoir d'autres dimensions, par exemple 2 cm sur 8 cm. Les dimensions de 7 cm sur 10 cm utilisées ici sont pratiques pour certaines des expériences décrites dans ce travail, car 7 cm est un peu plus grand que le diamètre du gobelet en plastique utilisé comme support.

Certains électroscopes ont un couvercle supérieur, bien que cela ne soit pas indispensable pour la réussite de la plupart des expériences décrites ici. Normalement, ce couvercle est un disque de carton fin dont le diamètre est égal au côté du rectangle (dans notre exemple, cela signifierait un disque de 7 cm de diamètre). Nous pouvons également recouvrir ce disque supérieur de feuille d'aluminium, mais là encore, cela n'est pas indispensable. Pour fixer le disque supérieur au rectangle, plusieurs

possibilités s'offrent à nous. (a) La possibilité la plus simple consiste à plier la bande supérieure horizontalement sur le rectangle (0,5 ou 1 cm de large et 7 cm de long). Le disque est ensuite collé sur cette bande. (b) Une autre façon de fixer le disque supérieur consiste à percer un trou en son centre. Une patte d'une attache-papier passe verticalement à travers ce trou et est fixée à l'intérieur de la paille en plastique verticale qui maintient le rectangle. La deuxième patte de l'attache-papier doit être placée horizontalement autour du disque et fixée à l'intérieur d'un deuxième trou percé à un endroit approprié du disque.

L'électroscope décrit dans la figure 6.2 est composé d'une seule bande mobile, le rectangle étant fixé au support. Un autre modèle courant d'électroscope comporte deux bandes mobiles, ou deux feuilles mobiles. C'est ce modèle qui est représenté dans la plupart des manuels d'électricité. La façon la plus simple de fabriquer un électroscope de ce type est de coller ensemble les extrémités supérieures de deux bandes de papier de soie au bord inférieur d'un rectangle. La figure 6.3 présente un électroscope de ce type. Une fois de plus, le rectangle en carton fin est fixé à une paille en plastique à l'aide de deux morceaux de ruban adhésif au dos. Dans la partie inférieure gauche de l'électroscope, nous collons les extrémités supérieures de deux bandes de papier de soie (ou deux fines bandes de feuille d'aluminium). Elles doivent être de même longueur et leurs extrémités inférieures doivent pouvoir s'éloigner librement l'une de l'autre. Nous pouvons appeler ce modèle un « électroscope classique ». Si nous le souhaitons, nous pouvons également coller quelques paires de bandes supplémentaires le long du bord inférieur du rectangle.

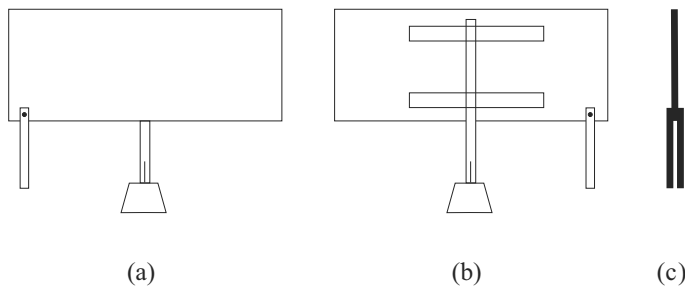


FIG. 6.3 : (a) Électroscope classique vu de face. (b) Vue arrière. (c) Vue de profil, montrant uniquement le carton fin et les deux bandes.

Nous pouvons également fabriquer un électroscope classique en pliant une bande de papier de soie en deux. Nous soutenons ensuite la bande par son centre à l'aide d'un support horizontal rigide, tel qu'un fil métallique. Les deux moitiés de la bande sont alors suspendues côte à côte, leurs extrémités inférieures pouvant s'éloigner l'une de l'autre. Le fil métallique doit être soutenu par le bas à l'aide de pailles en plastique, ou par le haut à l'aide de fils de soie.

Le modèle le plus raffiné de l'électroscope classique est fabriqué à partir de deux feuilles d'or. Il est généralement entouré d'un couvercle en verre afin d'éviter les perturbations dues au flux d'air.

6.2 Expériences avec l'électroscope

Expérience 6.1

Nous frottons une paille en plastique dans des cheveux et l'approchons lentement de la partie supérieure de l'électroscope, sans le toucher. La bande s'éloigne de l'électroscope. Lorsque nous retirons la paille, la bande reprend son orientation verticale initiale le long du carton fin, figure 6.4.

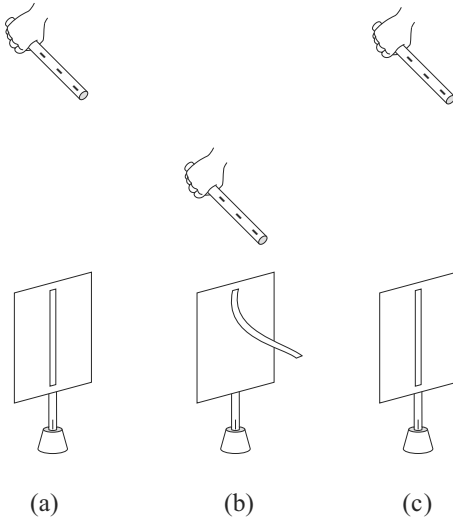


FIG. 6.4 : (a) et (b) : Lorsque nous approchons un plastique chargé de l'électroscope, sans le toucher, la bande se soulève. (c) Lorsque nous éloignons le plastique chargé, la bande s'abaisse.

Expérience 6.2

Nous répétons l'expérience 6.1, mais cette fois-ci, nous raclons la paille sur le bord supérieur de l'électroscope. L'idéal est de toucher le carton fin avec une partie de la paille frottée qui est proche des doigts qui la tiennent. Nous raclons ensuite la paille tout en l'éloignant du rectangle. La paille doit être raclée vers l'arrière du rectangle, et non vers la bande. Cette procédure peut être répétée une ou plusieurs fois, en faisant tourner la paille pendant qu'elle est raclée, si possible. Afin de faciliter le raclage, nous pouvons fixer l'électroscope en tenant sa paille en plastique verticale. Cependant, nous ne devons jamais toucher le rectangle, qui est fait de carton fin, ni la bande de papier. Nous observons que la bande s'éloigne de l'électroscope lorsqu'elle est frottée.

Nous éloignons maintenant la paille frottée de l'électroscope. Dans ce cas, nous observons que la bande reste relevée, éloignée du rectangle, figure 6.5.

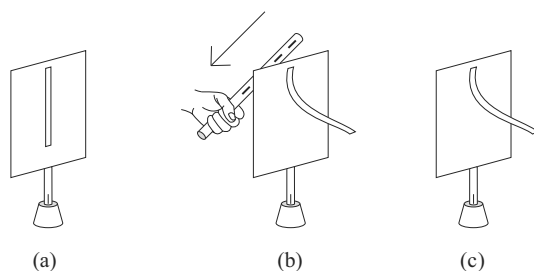


FIG. 6.5 : (a) Électroscope avec sa bande orientée vers le bas. (b) Nous raclons le bord supérieur du rectangle avec une paille frottée. (c) Lorsque la paille est retirée, la bande reste éloignée de l'électroscope !

Expérience 6.3

Après avoir réalisé l'expérience 6.2 et retiré la paille frottée, la bande reste éloignée de l'électroscope. Lorsque nous approchons lentement notre doigt latéralement de l'extrémité inférieure de cette bande, sans les laisser entrer en contact, nous observons que la bande est attirée par le doigt et se déplace.

D'après ce que nous avons vu dans la section 3.5, cela signifie que l'électroscope s'est chargé électriquement grâce à la procédure de l'expérience 6.2. Il a été chargé en raclant un plastique frotté sur son bord. Cette expérience est analogue à l'expérience 4.7.

Mais nous avons maintenant quelque chose de nouveau. Lorsque nous avons chargé un pendule électrique par la méthode *ACR*, le pendule a été repoussé par le plastique frotté lorsque nous avons approché le plastique du pendule. Cependant, lorsque nous avons retiré le plastique frotté, le fil du pendule est revenu à la verticale, bien que le pendule soit resté chargé. Si nous n'avions pas vu cette expérience et regardé le pendule vertical, nous ne saurions pas si le pendule était chargé ou non. Afin de tester cette condition, nous pourrions approcher notre doigt du disque en papier du pendule, sans le toucher. Si le pendule ne bougeait pas, cela indiquerait qu'il était neutre. En revanche, si le pendule s'orientait vers le doigt, nous saurions qu'il a été chargé par un mécanisme quelconque. Afin de connaître le signe de cette charge, nous pourrions déplacer un autre corps dont la charge est connue, positive par exemple, près du pendule. Si une répulsion se produisait, nous saurions que le pendule était chargé positivement. Si une forte attraction se produisait, nous saurions que le pendule était chargé négativement.

L'électroscope, en revanche, présente un comportement différent. Une fois chargé, son ruban reste éloigné du rectangle même lorsque la paille frottée utilisée pour le charger a été éloignée du système. Cela signifie qu'il suffit de regarder le ruban d'un électroscope pour savoir s'il est chargé ou non. Lorsque la bande pointe verticalement vers le bas, avec le rectangle, l'électroscope est déchargé. Lorsque la bande est relevée, loin du rectangle, nous savons que l'électroscope a été chargé. Ce qui empêche la bande de tomber dans cette dernière situation, comme elle devrait le faire en raison

de son poids, c'est la répulsion entre les charges le long de la bande et les charges de même signe réparties sur le rectangle de carton fin.

Expérience 6.4

Nous chargeons l'électroscope comme dans l'expérience 6.2. Nous retirons le plastique frotté et la bande reste relevée, éloignée de l'électroscope. Nous approchons maintenant notre doigt du bord supérieur de l'électroscope et le touchons. Immédiatement, la bande retombe et se colle au rectangle. Lorsque nous retirons notre doigt, la bande reste verticale, figure 6.6.

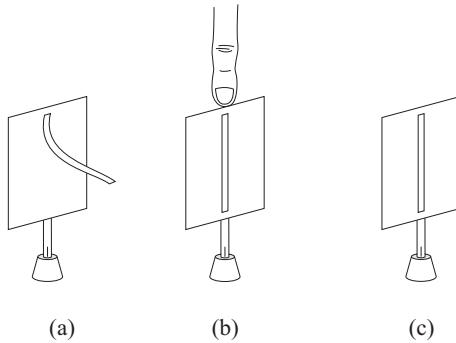


FIG. 6.6 : Décharger un électroscope en le touchant. (a) Un électroscope initialement chargé. (b) Lorsque nous touchons le bord supérieur du carton, la bande descend. (c) La bande reste verticale après avoir retiré le doigt.

Lorsque nous approchons à nouveau un doigt de l'extrémité inférieure de la bande par le côté, nous observons que la bande ne se déplace plus vers le doigt, comme elle le faisait auparavant dans l'expérience 6.3. Nous en concluons que nous avons déchargé l'électroscope lorsque nous avons touché le carton fin, comme c'était le cas dans l'expérience 4.9. Cela est dû à la mise à la terre électrique, section 4.5.

Expérience 6.5

Nous chargeons l'électroscope en le raclant avec une paille frottée, comme dans l'expérience 6.2. Nous utilisons à nouveau la paille frottée que nous avons utilisée précédemment pour charger l'électroscope. Plus précisément, nous approchons lentement la paille de la bande relevée de l'électroscope. 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. Nous devons observer 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, nous observons que la bande se déplace vers le rectangle, c'est-à-dire qu'elle s'éloigne de la paille frottée qui s'approche.

Nous pouvons même faire bouger la bande d'avant en arrière avec la paille frottée, en la rapprochant et en l'éloignant de la bande. La bande se déplacera à la même

vitesse, vers l'électroscope et loin de lui. Si nous voulons observer ce mouvement oscillatoire de la bande, l'amplitude du mouvement de la paille frottée doit être faible. Autrement dit, nous devons effectuer de petits mouvements et éviter de l'approcher trop près de la bande, figure 6.7.

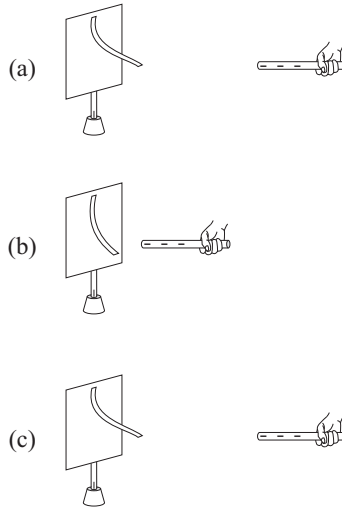


FIG. 6.7 : Répulsion entre le plastique chargé et l'électroscope chargé par ce plastique frotté. (b) Lorsque le plastique est approché de l'électroscope, la bande descend. Lorsque le plastique est éloigné de l'électroscope, la bande remonte, (a) et (c).

Cela montre que dans l'expérience 6.2, l'électroscope s'est chargé d'une charge de même signe que celle de la paille frottée, car il existe une répulsion entre eux. Nous pouvons alors représenter les charges de l'électroscope électrisé comme ayant le même signe que les charges du plastique frotté qui a été raclé sur le carton fin, figure 6.8.

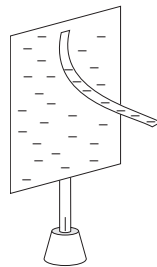


FIG. 6.8 : Les charges se répartissent sur un électroscope qui a été électrisé avec une paille négative.

Expérience 6.6

Nous répétons l'expérience 6.2 en chargeant négativement un électroscope en le raclant avec une paille frottée avec des cheveux. Lorsque nous retirons la paille, la bande reste relevée. Nous chargeons une autre paille positivement, comme dans l'expérience 5.15. Nous approchons lentement cette deuxième paille de l'électroscope, en évitant qu'elles n'entrent en contact. Dans ce cas, il y a une attraction entre elles. Cette attraction est si forte que nous pouvons même faire remonter la bande au-delà du bord supérieur de l'électroscope, la faisant suivre la paille positive, figure 6.9 !

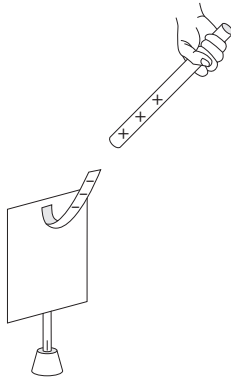


FIG. 6.9 : Attraction entre une paille positive et un électroscope négatif.

Expérience 6.7

Nous chargeons deux électroscopes en les raclant avec des pailles frottées avec des cheveux, comme dans l'expérience 6.2. Nous retirons les pailles et les bandes restent relevées. Nous plaçons ces deux électroscopes chargés face à face, dans des plans parallèles, les deux bandes relevées l'une vers l'autre. Nous rapprochons lentement les électroscopes l'un de l'autre, sans laisser les bandes entrer en contact. Nous observons qu'ils ont tendance à s'éloigner l'un de l'autre, chacun retournant vers le rectangle de son propre électroscope.

Cela montre une fois de plus la répulsion entre les charges de même signe.

Expérience 6.8

Nous chargeons un électroscope négativement en le raclant avec une paille frottée avec des cheveux, comme dans l'expérience 6.2. Un autre électroscope est chargé positivement en le raclant avec une autre paille frottée entre deux tuyaux en caoutchouc dur. Nous retirons les pailles et les bandes restent relevées. Ces deux électroscopes sont placés en parallèle et face à face, les bandes pointant l'une vers l'autre. Nous rapprochons lentement les deux électroscopes l'un de l'autre, en évitant que les bandes n'entrent en contact. Cette fois, nous observons que les bandes s'attirent mutuellement, chaque bande s'éloignant de son propre carton, figure 6.10.

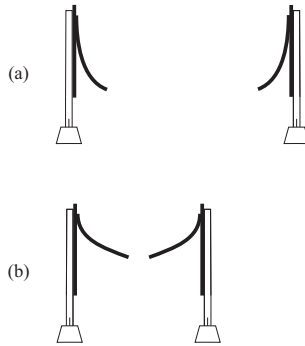


FIG. 6.10 : Attraction entre les bandes de deux électroscopes de charges opposées.

Expérience 6.9

Nous commençons l'expérience avec un électroscope initialement déchargé. Nous frottons une paille dans des cheveux. Une petite partie de la paille frottée touche le bord supérieur de l'électroscope et le racle, comme dans l'expérience 6.2. Nous observons que la bande s'élève selon un angle θ_1 par rapport à l'électroscope.

Sans toucher le carton fin de l'électroscope ni la bande de papier, nous raclons à nouveau la paille frottée sur le bord supérieur de l'électroscope. Lorsque nous retirons la paille, la bande reste relevée, mais elle est désormais inclinée d'un angle θ_2 supérieur à θ_1 . Autrement dit, $\theta_2 > \theta_1$. Ceci est illustré dans la figure 6.11.

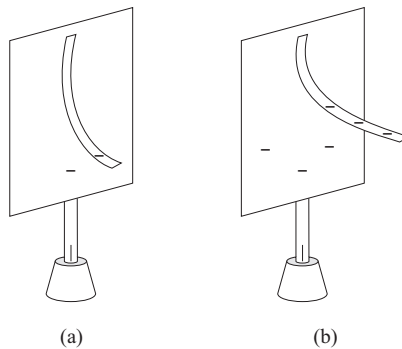


FIG. 6.11 : L'angle de déplacement d'une bande par rapport à l'électroscope est une mesure de la quantité de charge qui s'y trouve.

Cette procédure peut être répétée plusieurs fois. Pendant cette procédure, la paille doit être frottée une ou plusieurs fois dans des cheveux.

Cette expérience montre que l'électroscope peut être utilisé pour mesurer la quantité de charge, conformément aux définitions de la section 5.7. Autrement dit, en augmentant la quantité de charge sur l'électroscope, nous augmentons l'angle entre la bande et le rectangle.

Une autre façon d'illustrer cet effet peut être observée avec l'électroscope classique. En augmentant sa quantité de charge, nous augmentons l'angle de séparation de ses deux feuilles, figure 6.12.

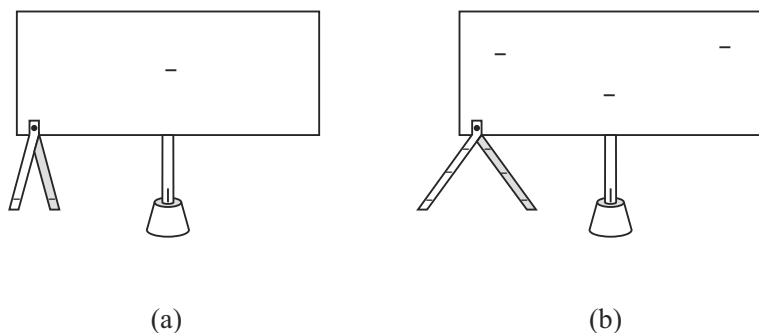


FIG. 6.12 : L'angle entre les deux bandes d'un électroscope mesure la quantité de charge qui s'y trouve.

6.3 Quels corps déchargent un électroscope par contact ?

Expérience 6.10

Nous avons vu dans l'expérience 6.4 que lorsque nous touchons un électroscope chargé avec notre doigt, celui-ci se décharge immédiatement. Nous le rechargeons à nouveau comme dans l'expérience 6.2. Nous tenons une extrémité d'une paille en plastique neutre avec notre main et touchons le bord supérieur de l'électroscope chargé avec l'autre extrémité de la paille. Dans ce cas, rien ne se passe au niveau de la bande, qui reste relevée, figure 6.13. Nous en concluons qu'une paille en plastique neutre n'élimine pas la charge de l'électroscope.

Expérience 6.11

Nous rechargeons l'électroscope, comme dans l'expérience 6.2. Cette fois-ci, nous tenons une extrémité d'une brochette en bois dans notre main. Nous touchons le bord supérieur de l'électroscope chargé avec l'autre extrémité de la brochette en bois. Nous observons que la bande tombe immédiatement, figure 6.14. Lorsque nous retirons la brochette en bois, la bande reste verticale. Nous en concluons que la brochette en bois a éliminé la charge de l'électroscope.

6.3.1 Définitions des conducteurs et des isolants

Les expériences 6.10 et 6.11, figures 6.13 et 6.14 présentent une distinction fondamentale entre les substances. En raison de l'importance de ces propriétés, deux noms ont été créés afin de classer les substances en deux groupes.

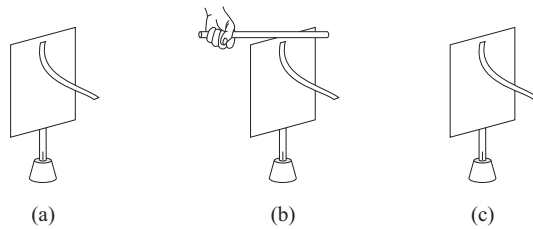


FIG. 6.13 : (a) Un électroscope initialement chargé. (b) Nous tenons une extrémité d'une paille en plastique neutre avec notre main et touchons le bord de l'électroscope avec l'autre extrémité de la paille. Rien ne se passe au niveau de la bande. (c) Lorsque nous retirons la paille, la bande reste relevée. Autrement dit, un électroscope chargé ne se décharge pas lorsque nous le touchons avec une paille en plastique neutre que nous tenons dans notre main.

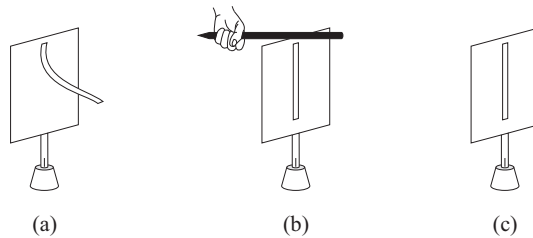


FIG. 6.14 : (a) Un électroscope initialement chargé. (b) Nous tenons une extrémité d'une brochette en bois avec notre main et touchons le bord supérieur de l'électroscope avec l'autre extrémité de la brochette. La bande tombe immédiatement. (c) Lorsque nous retirons la brochette, la bande reste en bas. Autrement dit, un électroscope chargé se décharge lorsque nous le touchons avec un morceau de bois dans notre main.

Définitions : Les substances qui déchargent un électroscope électrisé simplement en le touchant sont appelées « conducteurs ». Les substances qui ne déchargent pas l'électroscope sont appelées « isolants », « non-conducteurs » ou « diélectriques ».

La découverte de ces deux types de substances est due à Gray en 1729. Il a également découvert certaines des principales propriétés de ces substances, publiant ses résultats dans un article fondamental en 1731, que nous aborderons plus en détail dans l'annexe B.¹ Les expressions « conducteur » et « isolant » semblent être dues à Jean Théophile Desaguliers (1683–1744).² L'une des citations de Desaguliers mentionne cela :^{3,4}

¹ [Gra31a].

² [Des41a] (faisant référence à [Des41c]), [Pri66, p. 82], et [Hei99, pp. 292–293, note 12].

³ [Des41a, p. 193].

⁴ In the following Account, which is the Sequel of former Experiments, I call *Conductors* those strings, to one End of which the rubb'd [glass] Tube is applied ; and *Supporters* such horizontal Bodies as the *Conductor* rests upon.

Dans le compte rendu suivant, qui fait suite aux expériences précédentes, j'appelle « conducteurs » les cordes à l'une des extrémités desquelles est appliqué le tube [en verre] frotté, et « supports » les corps horizontaux sur lesquels repose le « conducteur ».

Avant Desaguliers, Du Fay avait déjà utilisé l'expression « isolé » pour désigner un conducteur soutenu par des corps qui ne permettent pas à l'électricité de s'échapper à travers eux. En 1733, Du Fay a discuté de la transmission de l'électricité le long de cordes suspendues par des fils de soie, un phénomène qui avait été découvert par Gray. Dans cet ouvrage, Du Fay a déclaré ce qui suit, notre accentuation en italique :⁵

Cette expérience prouve combien il est nécessaire que la corde dont on se sert pour transmettre au loin l'électricité, soit *isolée*, ou ne soit soutenue que de corps les moins propres qu'il est possible à se charger eux-mêmes de l'électricité.

En 1737, il a déclaré ce qui suit, notre accentuation en italique :⁶

M'étant donc assuré de cette égalité pour les expériences que j'avois dessein de tenter, je me suis servi d'une barre de fer d'un pouce en carré [6 cm²] & de quatre pieds de long [122 cm], elle étoit, comme je l'ai dit, suspenduë sur des cordons de soye & *isolée*, afin que rien ne pût détourner le tourbillon électrique qui lui seroit communiqué par le tube [en verre frotté].

Il est possible que l'expression « isolant » trouve son origine dans ces citations de Du Fay. Dans l'annexe B, nous abordons plus en détail les travaux de Gray.

Expérience 6.12

Nous répétons maintenant les expériences 6.10 et 6.11 afin de découvrir quelles substances sont conductrices et lesquelles sont isolantes. La procédure sera toujours la même. Nous chargeons un électroscope en le raclant avec une paille en plastique frottée, comme dans l'expérience 6.2. Nous retirons la paille. Nous tenons ensuite un certain objet avec nos mains et touchons le bord supérieur du rectangle de carton fin avec une partie de cet objet. Si l'électroscope se décharge, nous disons que la substance est un conducteur. Si l'électroscope ne se décharge pas, nous disons que la substance est un isolant.

Cette expérience peut être réalisée avec des fils simples de plusieurs matériaux : coton, soie, polyester, polyamide synthétique, cheveux, cuivre, etc. Elle peut également être réalisée avec des matériaux solides tels que le métal, le bois, le verre, le caoutchouc, le plastique, le papier, le papier de soie, etc.

Dans certains cas, il est plus facile de tenir la paille en plastique verticale qui soutient l'électroscope chargé, puis de toucher le coin du carton fin avec la substance à tester, comme un mur, un tableau noir, un meuble, etc. Comme toujours, nous devons éviter de toucher le rectangle de carton fin et sa bande avec nos mains, afin d'empêcher la mise à la terre électrique par notre corps.

⁵[DF33d, p. 249].

⁶[DF37b, p. 94].

Expérience 6.13

La procédure décrite dans le dernier paragraphe de l'expérience 6.12 convient également pour déterminer quels liquides sont conducteurs ou isolants. Avant de commencer ces tests, nous prenons un récipient vide qui sera ensuite rempli de différents liquides. Nous devons utiliser un récipient conducteur. Afin de savoir si le récipient est conducteur ou isolant, nous chargeons un électroscope et touchons le récipient avec le carton fin. Si l'électroscope se décharge après ce contact, cela signifie que le récipient est réellement conducteur. Les récipients en métal, en verre ou en bois sont des exemples de récipients appropriés. Nous pouvons alors poursuivre l'expérience.

Au départ, nous remplissons complètement le récipient avec le liquide à tester. Nous illustrons maintenant ce qui se passe avec un liquide conducteur comme l'eau, figure 6.15. Dans (a), nous avons un électroscope chargé. Dans (b), nous plongeons un bord de l'électroscope dans l'eau. Le carton ne doit pas toucher le récipient, seulement l'eau. Nous observons que la bande s'abaisse. (c) Lorsque nous retirons l'électroscope de l'eau, la bande reste abaissée.

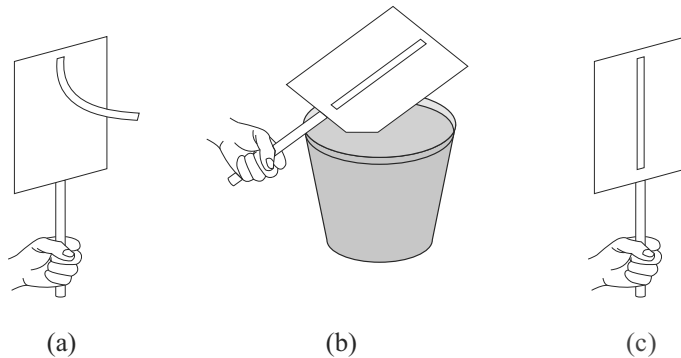


FIG. 6.15 : (a) Un électroscope initialement chargé. (b) Nous plongeons un bord de l'électroscope dans l'eau. Sa bande descend. (c) Lorsque nous retirons l'électroscope de l'eau, la bande reste en bas.

Dans la figure 6.16, nous illustrons ce qui se passe dans le cas d'un liquide isolant comme l'huile végétale de cuisine. Dans (a), nous avons un électroscope électrisé. Nous le tenons uniquement par sa paille en plastique pour éviter de toucher le carton fin ou la bande surélevée. Nous plongeons ensuite un bord du carton dans le liquide. Le carton ne doit pas toucher le récipient, seulement l'huile. Nous observons que la bande reste relevée, comme dans (b). Lorsque nous retirons l'électroscope du liquide, sa bande reste relevée, comme dans (c).

La même procédure peut également être appliquée pour déterminer si d'autres substances, telles que la farine ou la semoule de maïs, sont conductrices. Pour cela, on remplit un récipient conducteur de farine. On plonge le bord de l'électroscope chargé dans la farine et on observe le comportement de sa bande. Au cours de cette procédure, il est important d'éviter de toucher le rectangle de carton fin ou sa bande avec le récipient conducteur et avec la main afin d'empêcher la décharge de l'électroscope.

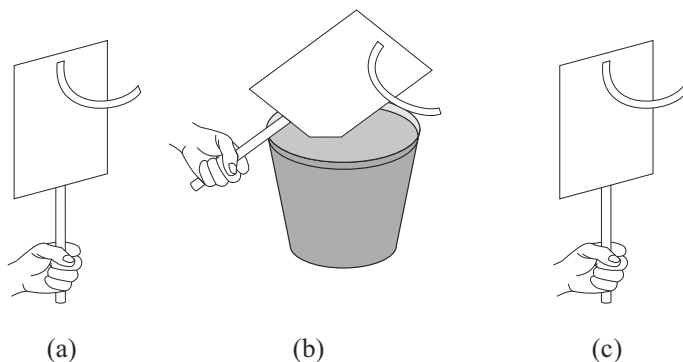


FIG. 6.16 : (a) Un électroscope initialement chargé d'électricité. (b) Nous plongeons un bord du carton dans un liquide isolant. La bande reste relevée. (c) Lorsque nous retirons l'électroscope du liquide, la bande reste relevée.

6.3.2 Corps qui se comportent comme des conducteurs et des isolants dans les expériences habituelles d'électrostatique

Afin d'établir une distinction claire entre les conducteurs et les isolants, l'idéal serait de considérer tous les corps de même forme et de même taille. Par exemple, nous pourrions toucher l'électroscope avec plusieurs cylindres de même longueur et de même diamètre, mais constitués de substances différentes. Mais pour l'instant, nous ne nous soucierons pas de la forme ou de la taille des corps à tester.

Le résultat final des expériences 6.10, 6.11, 6.12 et 6.13 réalisées avec de nombreuses substances est le suivant :

- **Conducteurs basés sur les expériences habituelles d'électrostatique :**
Air humide, corps humain, tous les métaux, papier, carton fin, papier de soie, feuille d'aluminium, bois, morceau de craie, la plupart des verres à température ambiante, porcelaine, eau douce, alcool, shampoing, kérosène, lait, boissons gazeuses, détergent, mur, tableau noir, liège, cuir, farine de blé, farine de maïs, fil acrylique, sel, sucre, sciure de bois, terre ou argile, brique, la plupart des types de caoutchouc, etc.
- **Isolants d'après les expériences habituelles d'électrostatique :**
Air sec, ambre, plastique, PVC, soie, verre chauffé, nylon ou polyamide synthétique, polyester, laine, un seul cheveu humain, tube acrylique, polystyrène, une barre de chocolat, huile végétale de cuisson, café moulu et quelques types de caoutchouc.

Le nombre de substances conductrices est beaucoup plus important que celui des substances isolantes. Ces deux listes nous permettent de constater que la plupart des substances sont conductrices, et que très peu sont isolantes. Certaines substances conductrices sont très efficaces et déchargent 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 lorsque nous le touchons avec un morceau de bois, par rapport au temps très court nécessaire pour le décharger lorsque nous touchons l'électroscope avec notre corps ou avec un morceau de métal.

Le verre doit être considéré séparément. La plupart des verres courants déchargent l'électroscope, bien que plus lentement que les métaux. En revanche, lorsqu'ils sont chauffés au feu ou au micro-ondes, ils peuvent se comporter comme des isolants. En d'autres termes, après avoir été chauffés, ils ne déchargent généralement pas l'électroscope, ou ils le déchargent beaucoup plus lentement qu'à température normale. Normalement, ils 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 se comportent alors comme des isolants. De nombreux scientifiques anciens, comme Gray et Du Fay, utilisaient des tubes de verre frottés dans leurs expériences, qu'ils tenaient dans leurs mains. Leurs tubes se comportaient comme des isolants. Ils mentionnaient souvent la nécessité de chauffer les tubes avant de les frotter, car cette procédure de chauffage augmentait la quantité de charge qu'ils acquéraient. Ce réchauffement permettait également à la charge acquise de rester plus longtemps à la surface des tubes. L'autre raison pour laquelle leurs verres pouvaient se comporter comme un isolant était probablement due à leur composition chimique. Ils utilisaient généralement du verre flint, un type de verre contenant du plomb dans sa composition. Ce type de verre est beaucoup plus isolant que la plupart des verres que l'on trouve aujourd'hui dans le commerce. Il n'est pas facile de trouver du verre flint de nos jours, sauf dans des magasins spécialisés.

Par temps sec et froid, l'électroscope peut rester chargé pendant plusieurs minutes. Dans ce cas, l'air autour de l'électroscope se comporte comme un bon isolant. En revanche, par temps chaud et humide, et surtout par temps pluvieux, il est difficile de maintenir l'électroscope chargé. Il se décharge normalement dès qu'il est électrisé en étant raclé avec une paille frottée. L'air qui l'entoure se comporte comme un conducteur dans ces situations. C'est pourquoi la plupart des expériences fonctionnent bien par temps sec, lorsque les charges générées dans les isolants peuvent être maintenues plus longtemps. De même, les charges situées dans des conducteurs isolés électriquement du sol peuvent être stockées plus longtemps par temps sec, par rapport au peu de temps pendant lequel elles peuvent être stockées par temps humide. Par temps humide, de nombreuses expériences ne fonctionnent pas comme prévu, ou les effets ne sont pas aussi visibles ou détectables.

La plupart des types de caoutchouc se comportent comme des conducteurs. Cela peut être dû à l'humidité à leur surface, à leur composition chimique ou à leurs processus de fabrication. Quelques types de caoutchouc se comportent comme des isolants. C'est pourquoi la procédure idéale consiste à tester toutes les substances disponibles. Ce n'est qu'après un test comme celui décrit ici que nous pouvons les classer en fonction de leur comportement.

La division des substances en conducteurs et isolants est l'un des aspects les plus importants de toute la science de l'électricité. Associé à l'existence de charges positives et négatives, avec des attractions et des répulsions, ce fait nous permet de comprendre tout un ensemble de phénomènes.

6.4 Quels corps chargent un électroscope par contact ?

Expérience 6.14

Deux électroscopes initialement déchargés sont placés en parallèle, face à face, avec les bandes à l'extérieur. Il doit y avoir une distance d'environ 15 cm entre eux. Une paille en plastique neutre est placée au-dessus des cartons fins des électroscopes, soutenue par ceux-ci, comme dans la figure 6.17. Après cette préparation, nous prenons une deuxième paille en plastique, que nous électrisons par frottement dans des cheveux.

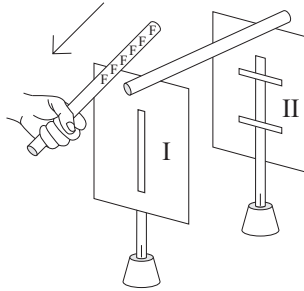


FIG. 6.17 : Deux électroscopes initialement déchargés avec leurs bandes à l'extérieur. Ils sont reliés par une paille neutre. Une deuxième paille chargée est raclée contre le carton de l'électroscope *I*.

Cette deuxième paille frottée est raclée contre le carton de l'électroscope *I* de la figure 6.17. Nous observons que seule la bande de l'électroscope *I* se soulève, tandis que celle de l'électroscope *II* reste immobile. Cette séquence d'opérations est illustrée dans la figure 6.18.

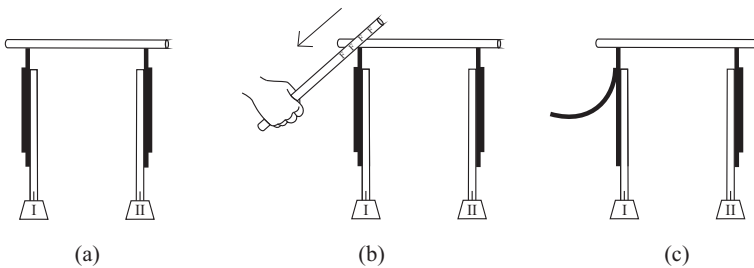


FIG. 6.18 : (a) Deux électroscopes initialement déchargés reliés par une paille neutre. (b) Une deuxième paille électrisée est raclée contre le bord supérieur de l'électroscope *I*. (c) La paille chargée est retirée. Nous observons que seule la bande de l'électroscope *I* se soulève.

Expérience 6.15

La procédure de l'expérience 6.14 est répétée. Mais cette fois, les deux électroscopes initialement neutres sont reliés par une brochette en bois pour barbecue, figure 6.19.

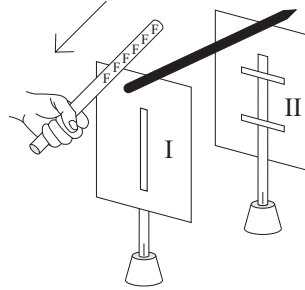


FIG. 6.19 : Deux électroscopes initialement déchargés sont reliés par une brochette en bois. Une paille électrisée est raclée uniquement contre l'électroscope I.

Une paille électrisée est raclée seulement contre l'électroscope I de la figure 6.19. Dans ce cas, nous observons que les deux bandes se lèvent. Cette séquence de procédures est illustrée dans la figure 6.20.

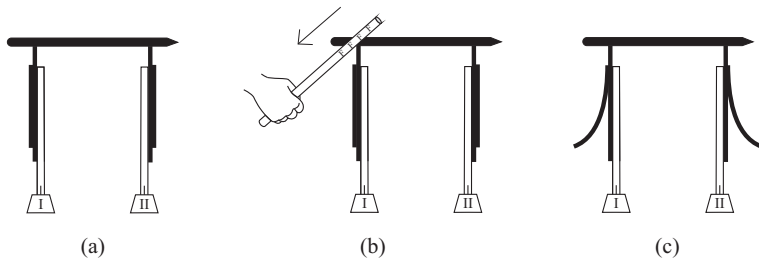


FIG. 6.20 : (a) Deux électroscopes initialement déchargés reliés par une brochette en bois. (b) Nous raclons uniquement l'électroscope I avec une paille électrisée. (c) La paille électrisée est retirée. Nous observons que les deux électroscopes ont été chargés.

Les expériences 6.14 et 6.15 sont l'opposé des expériences 6.4, 6.10, 6.11 et 6.12. Dans ces cas, nous avons observé quels corps déchargeaient ou ne déchargeaient pas un électroscope électrisé, en touchant cet électroscope avec cette substance dans notre main. Nous analysons maintenant quelles substances chargent ou non l'électroscope II initialement déchargé, lorsque nous le connectons par l'intermédiaire de cette substance à l'électroscope I qui est chargé en le raclant avec une paille électrisée. Le résultat est le même. Autrement dit, une paille en plastique neutre ne décharge pas un électroscope électrisé lorsqu'elle le touche, comme dans l'expérience 6.10. Elle ne charge pas non plus l'électroscope II lorsque ce corps est le lien matériel entre les

électroscopes *I* et *II*, lorsque l'électroscope *I* est chargé en le raclant avec une paille électrisée, comme dans l'expérience 6.14. En revanche, une brochette en bois charge l'électroscope *II* dans ce cas, comme dans l'expérience 6.15.

Expérience 6.16

Les expériences 6.14 et 6.15 peuvent facilement être appliquées à d'autres substances. Nous pouvons, par exemple, les relier par leur bord supérieur à l'aide d'un fil (en coton, polyester, cuivre, etc.), d'un bâton (en bois, métal, plastique, PVC, etc.), d'une bande (en papier, feuille d'aluminium, papier de soie, tissu, etc.), etc. Après cette procédure, nous frottons une paille en plastique. Nous utilisons ensuite ce plastique frotté pour charger le premier électroscope en le raclant avec la paille frottée, comme décrit dans l'expérience 6.2. Pendant ce processus, nous observons le comportement du deuxième électroscope. Si la bande de ce deuxième électroscope ne bouge pas et reste pointée vers le bas, cela signifie que la substance reliant les deux électroscopes n'a pas permis le transfert de charges entre eux. Autrement dit, cette substance est un isolant. En revanche, si la bande du deuxième électroscope s'en éloigne et reste relevée, cela signifie qu'il y a eu un transfert de charges entre les deux électroscopes. Une partie de la charge accumulée dans le premier électroscope a alors été conduite à travers la substance de connexion vers le deuxième électroscope. En réalisant cette expérience, nous observons que les substances considérées comme des isolants dans l'expérience 6.12 ne permettent pas au deuxième électroscope d'être chargé. En revanche, les substances considérées comme des conducteurs dans l'expérience 6.12 permettent au deuxième électroscope de cette expérience d'être chargé.

6.5 Les composants fondamentaux d'un versorium, d'un pendule électrique et d'un électroscope

Maintenant que nous connaissons la distinction entre les conducteurs et les isolants, ainsi que leurs principales propriétés, nous pouvons comprendre la structure des instruments construits jusqu'à présent.

Dans le cas d'un versorium métallique, nous avons une aiguille conductrice horizontale (comme une attache-papier en acier), figures 3.4 et 6.21 (a). Normalement, elle est soutenue par une épingle conductrice verticale fixée à une planche de bois ou à un bouchon de liège. Autrement dit, tous les éléments de ce versorium sont des conducteurs. Le versorium en plastique est muni d'un chapeau isolant, figures 3.5 et 6.21 (b). Le versorium de Du Fay, quant à lui, est composé d'un chapeau isolant en plastique et comporte un conducteur à l'une de ses extrémités, la feuille d'aluminium, figures 4.22 et 6.21 (c).

Le pendule électrique est composé d'un fil de soie isolant avec un conducteur à son extrémité inférieure, le disque en papier, figure 6.22. Le fil de soie est essentiel. C'est ce fil, associé aux pailles en plastique qui composent le pendule, qui empêche la charge acquise par la méthode ACR de se décharger vers le sol. Sans ce fil de soie et ces

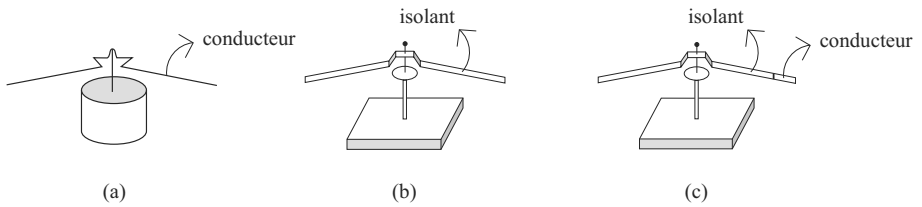


FIG. 6.21 : Composants d'un versorium. (a) Versorium métallique. (b) Versorium en plastique. (c) Versorium Du Fay.

pailles en plastique, le disque en papier ne pourrait pas rester chargé après avoir été en contact avec un matériau frotté. Si le disque en papier était attaché, par exemple, à un fil de coton soutenu par une brochette en bois, nous ne pourrions pas observer le mécanisme d'attraction, de contact et de répulsion.

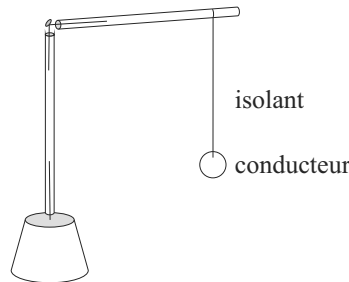


FIG. 6.22 : Composants d'un pendule électrique.

Les fils en nylon (polyamide synthétique) et en polyester se comportent également comme des isolants. Nous pouvons donc utiliser ces fils pour fabriquer un pendule électrique. En revanche, nous ne devons pas utiliser de fil en coton.

L'électroscope, quant à lui, est composé de deux conducteurs, le rectangle de carton fin et la bande de papier de soie, soutenus par un isolant, la paille en plastique, figure 6.23. Ce plastique est essentiel. C'est la propriété isolante du plastique qui empêche la décharge d'un électroscope électrisé vers le sol.

Si nous avons une brochette en bois à la place d'un morceau de plastique, l'électroscope se déchargerait toujours vers le sol après avoir été frotté avec une paille. Il serait donc impossible de le maintenir chargé après l'avoir chargé.

6.6 L'influence de la différence de potentiel électrique sur le comportement conducteur ou isolant d'un corps

Dans les expériences 6.4, 6.10 et 6.12, les matériaux ont été classés comme conducteurs (isolants) s'ils déchargeaient (ne déchargeaient pas) un électroscope chargé. Une

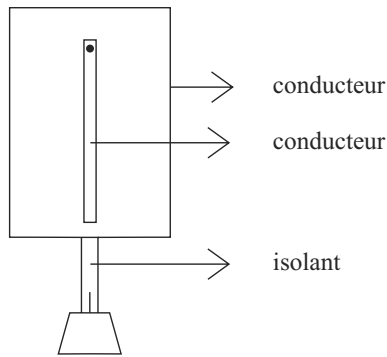


FIG. 6.23 : Composants d'un électroscope.

autre façon de procéder à cette classification consiste à observer si les matériaux déchargent ou non une batterie électrique.

Définitions : Les matériaux qui déchargent une batterie par le biais d'une connexion entre la borne positive et la borne négative de la batterie sont appelés « conducteurs ». Les matériaux qui ne déchargent pas la batterie sont appelés « isolants ». Voyons comment procéder à cette classification.

Expérience 6.17

Les matériaux utilisés dans cette expérience sont représentés dans la figure 6.24. Nous utilisons trois morceaux de fil de cuivre isolé, non isolés à leurs extrémités, figure 6.24 (a), et une nouvelle pile alcaline de grande taille, de type *D*, qui génère une différence de potentiel de 1,5 volt entre ses pôles, figure 6.24 (b). Il est également utile d'utiliser un support de pile afin de faciliter les connexions électriques avec les fils. Nous utilisons également une petite ampoule de 1,5 volt et une douille. Un interrupteur est également utile, bien qu'il ne soit pas indispensable, figure 6.24 (c). Ces articles sont disponibles dans les magasins spécialisés en électricité et en électronique.

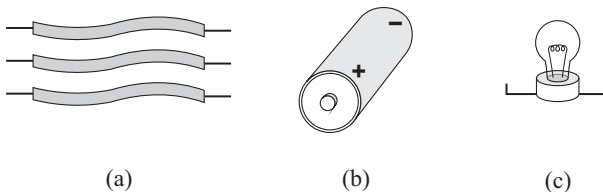


FIG. 6.24 : (a) Trois morceaux de fil de cuivre isolé (dénudez les extrémités). (b) Une pile neuve de taille *D*. (c) Une ampoule de 1,5 volt et une douille.

Une extrémité non isolée du premier fil est connectée à la borne négative de la batterie. L'autre extrémité de ce premier fil est formée en crochet et appelée *A*, comme

dans la figure 6.25. 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, appelée *B*, est aussi formée en crochet. L'autre extrémité libre de ce troisième fil, appelée *A*, figure 6.25.

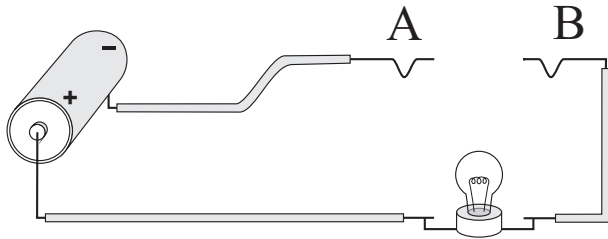


FIG. 6.25 : Testeur de circuit.

Lorsque tout est prêt, nous prenons un quatrième morceau de fil de cuivre, non isolé aux extrémités. Une extrémité de ce quatrième fil est connectée à *A* et l'autre extrémité à *B*. L'ampoule devrait s'allumer. Cela indiquera que les connexions ou contacts électriques sont correctement établis. De plus, cela indiquera qu'il y a un courant électrique qui circule dans les fils et l'ampoule, comme illustré dans la figure 6.26.

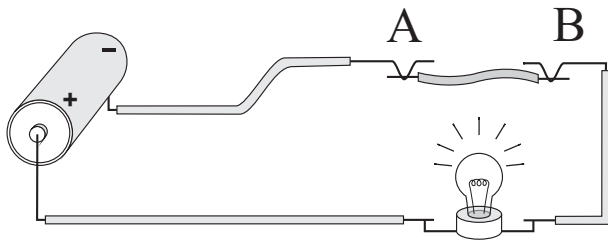


FIG. 6.26 : Lorsque les extrémités non isolées d'un fil de cuivre sont connectées aux extrémités *A* et *B*, l'ampoule s'allume.

Comme l'ampoule s'allume, on dit que le fil de cuivre est un conducteur d'électricité lorsqu'il est soumis à une différence de potentiel de $1,5 \text{ volt} = 1,5 \text{ V}$.

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, la meilleure solution consiste à ouvrir le contact (c'est-à-dire à retirer le quatrième fil) dès que l'ampoule s'allume.

Expérience 6.18

Avant de passer à la procédure suivante, il est essentiel de s'assurer que l'expérience 6.17 fonctionne correctement avec chacun des matériaux que nous allons

utiliser. Cela indiquera que tous les contacts électriques sont bien établis et fonctionnent correctement. Nous supposons que c'est le cas. Nous supposons également que la pile est encore neuve et chargée après le retrait du quatrième fil.

Nous connectons maintenant 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 6.27 (a).

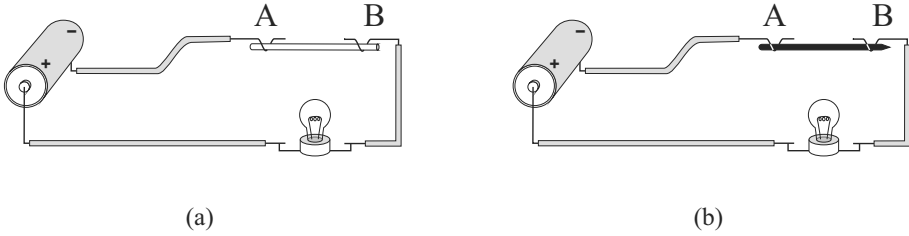


FIG. 6.27 : (a) L'ampoule ne s'allume pas lorsque nous relierions *A* et *B* avec une paille en plastique. (b) L'ampoule reste également éteinte lorsque *A* et *B* sont reliés avec une brochette en bois.

Définition : Le plastique est un matériau isolant lorsqu'il est soumis à une différence de potentiel de 1,5 volt. La raison de cette définition est qu'il ne permet pas la décharge de la batterie lorsqu'il relie ses bornes positive et négative. Cela est indiqué par le fait que l'ampoule ne s'allume pas lorsque *A* et *B* sont reliés par une paille en plastique.

Expérience 6.19

Nous répétons l'expérience 6.17, mais nous connectons maintenant *A* et *B* avec d'autres substances.

Pour plus de commodité, nous pourrions placer un interrupteur optionnel au milieu du premier ou du deuxième fil. Grâce à cet interrupteur, nous pouvons ouvrir ou fermer le circuit électrique à volonté. Nous ouvrons l'interrupteur et plaçons la substance à tester entre *A* et *B*. Nous fermons ensuite l'interrupteur et observons l'ampoule.

Définitions : Lorsque l'ampoule s'allume, la substance est appelée conductrice. Lorsque l'ampoule ne s'allume pas, la substance est appelée isolante. Nous pouvons tester toutes les substances répertoriées dans l'expérience 6.12.

Ceci est illustré dans la figure 6.27 (b) où *A* et *B* sont reliés par une brochette en bois. Dans ce cas, l'ampoule ne s'allume pas. Selon notre définition, cela indique que le bois est un isolant lorsqu'il est soumis à une différence de potentiel de 1,5 volt, même si la brochette en bois est un conducteur à des tensions beaucoup plus élevées.

Expérience 6.20

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, nous connectons *A* et *B* à ce récipient vide. Nous supposons que l'ampoule ne s'allume pas, ce qui indique que ce récipient est un isolant à 1,5 volt.

Le gobelet en plastique est ensuite rempli du liquide à tester. Ensuite, les bornes *A* et *B* sont immergées dans le liquide. La figure 6.28 illustre ce qui se passe avec de l'eau fraîche du robinet ou de l'eau de pluie.

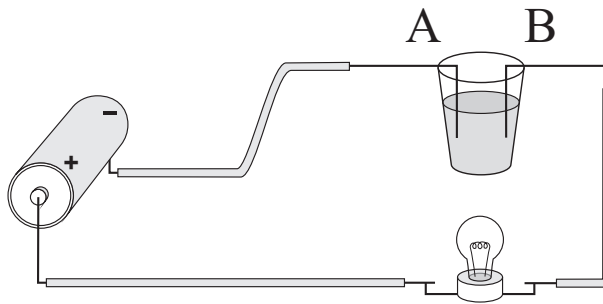


FIG. 6.28 : L'ampoule ne s'allume pas lorsque *A* et *B* sont reliés à de l'eau douce.

Autrement dit, l'ampoule ne s'allume pas, ce qui indique que l'eau douce est un isolant lorsqu'elle est soumise à une différence de potentiel de 1,5 volt.

6.6.1 Substances qui se comportent comme des conducteurs et des isolants pour de faibles différences de potentiel

Nous effectuons plusieurs tests analogues aux expériences 6.17 à 6.20. Le résultat final est le suivant :

- **Substances qui se comportent comme des conducteurs lorsqu'elles sont soumises à une différence de potentiel de 1,5 V :**

Tous les métaux.

- **Substances qui se comportent comme des isolants lorsqu'elles 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, 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, alcool, shampoing, kérosène, lait, boissons gazeuses, détergent, huile végétale de cuisine, mur, tableau noir, liège, cuir, farine de blé, farine de maïs, fil acrylique, sel, sucre, sciure de bois, terre ou argile, brique, caoutchouc, etc.

Nous pouvons comparer les résultats de cette expérience avec ceux des expériences 6.12 et 6.13. La conclusion est que les concepts de « conducteurs » et « isolants » sont relatifs. Autrement dit, des substances telles que le verre et le bois, qui se comportent comme des conducteurs dans les expériences habituelles d'électrostatique, se comportent désormais comme des isolants lorsqu'elles sont soumises à une différence de potentiel de 1,5 V. Nous n'entrerons pas dans les détails ici, mais en électrostatique, il est courant de travailler avec des différences de potentiel allant de 1 000 volts à 10 000 volts (c'est-à-dire entre 10^3 V et 10^4 V). La différence de potentiel mentionnée ici est celle entre le corps chargé (comme un morceau de plastique frotté ou un électroscope chargé) et la terre ; ou entre les extrémités d'un corps (lorsque nous voulons tester si ce corps se comporte comme un conducteur ou comme un isolant). Dans ces cas, la plupart des substances se comportent comme des conducteurs, comme nous l'avons vu précédemment. En revanche, la différence de potentiel générée entre les pôles des piles chimiques ou des batteries courantes est beaucoup plus faible, allant de 1 V à 10 V. Pour ces faibles différences de potentiel, plusieurs substances comme le bois, le papier, le caoutchouc et le verre se comportent comme des isolants. Cela montre qu'il faut être très prudent lorsqu'on classe les substances comme conductrices ou isolantes. Après tout, le comportement de toutes les substances dépend non seulement de leurs propriétés intrinsèques, mais aussi de la différence de potentiel externe à laquelle elles sont soumises. C'est un aspect très important qu'il faut toujours garder à l'esprit.

Il existe une gradation entre les expériences habituelles d'électrostatique et les expériences pour lesquelles il existe une différence de potentiel de quelques volts. En d'autres termes, il existe une gradation dans les propriétés conductrices et isolantes des corps lorsque l'on passe d'une différence de potentiel de 10 000 V à une différence de potentiel de quelques volts.

En raison de ce fait, il pourrait être approprié de modifier notre 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. Il en va de même pour le corps *B*. Mais cela 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, qui dépendent non seulement des propriétés intrinsèques de ces corps, mais aussi des conditions externes auxquelles ils sont soumis.

6.7 Autres aspects qui influencent les propriétés conductrices et isolantes d'une substance

Les conducteurs ont été définis dans la sous-section 6.3.1 comme les substances qui déchargent un électroscope chargé lorsque nous touchons l'électroscope avec cette substance. Les isolants, en revanche, ont été définis comme les substances qui ne dé-

chargent pas un électroscope chargé lorsque nous touchons l'électroscope avec elles. Dans la section 6.6, nous avons vu qu'il s'agit de définitions relatives. En effet, selon la différence de potentiel électrique agissant sur les extrémités d'une substance, celle-ci peut se comporter comme un conducteur ou comme un isolant. Dans cette section, nous aborderons brièvement trois autres aspects qui ont également une influence sur ces définitions.

6.7.1 Le temps nécessaire pour décharger un électroscope électrisé

Expérience 6.21

Nous chargeons un électroscope et le laissons sur une table par temps sec. Nous observons que la bande reste relevée pendant plusieurs secondes, voire quelques minutes. Cependant, si nous attendons suffisamment longtemps, par exemple une heure, l'électroscope sera totalement déchargé.

Cela signifie que les définitions de conducteur et d'isolant de la sous-section 6.3.1 dépendent du temps d'observation. Pendant un intervalle de quelques secondes, l'air sec peut être considéré comme un bon isolant. En revanche, pendant un intervalle d'une heure, l'air sec peut être classé comme un conducteur, car il permet la décharge d'un électroscope.

Définitions : Dans les présentes définitions, nous nous référons aux procédures expérimentales décrites dans la section 6.3. Aux fins du présent ouvrage, nous pouvons définir les « bons conducteurs » comme les substances qui déchargent un électroscope électrisé lorsqu'elles entrent en contact avec lui pendant un intervalle de temps inférieur à 5 secondes. Les « mauvais conducteurs » ou « mauvais isolants » sont les substances qui déchargent l'électroscope pendant un intervalle de temps compris entre 5 et 30 secondes. Ces corps sont également appelés « pauvres conducteurs », « pauvres isolants », « conducteurs imparfaits » ou « isolants imparfaits ». Enfin, les « bons isolants » sont les substances qui nécessitent un intervalle de temps supérieur à 30 secondes pour décharger un électroscope chargé.

6.7.2 La longueur d'une substance qui entre en contact avec un électroscope électrisé

Expérience 6.22

Nous découpons plusieurs bandes de papier, de 2 cm de large et d'une longueur variant de 10 cm à 1 m. Nous chargeons un électroscope et le posons sur une table par temps sec. Nous tenons une extrémité de la bande de 10 cm avec notre main et touchons son extrémité libre au bord du carton fin de l'électroscope. Nous observons une décharge rapide de l'électroscope. D'après la définition de la sous-section 6.7.1, cela signifie que cette bande peut être considérée comme un bon conducteur.

Nous chargeons à nouveau l'électroscope et utilisons cette fois une bande de papier de 30 cm × 2 cm. Nous tenons une extrémité de la bande de papier avec notre

main et son extrémité libre touche le carton de l'électroscope. Nous pouvons maintenant facilement remarquer l'intervalle de temps nécessaire de quelques 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 qu'avec le temps, la quantité de charge perdue par un électroscope électrisé augmente, voir sous-section 6.7.1. La seule différence est que, dans la situation actuelle, l'électroscope se décharge principalement à travers la bande de papier et non à travers 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. Nous observons que l'électroscope reste chargé pendant plusieurs secondes. D'après la définition de la sous-section 6.7.1, cela signifie 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 notre main et le carton de l'électroscope, nous augmentons le temps nécessaire pour décharger l'électroscope.

6.7.3 La section transversale d'une substance qui entre en contact avec un électroscope électrisé

Expérience 6.23

Nous chargeons un électroscope et le posons sur une table. Nous tenons l'extrémité d'un cheveu humain dans notre main et touchons l'autre extrémité du cheveu avec le carton fin d'un électroscope chargé. Nous observons que l'électroscope reste chargé pendant plusieurs secondes. Cela indique que nous pouvons classer un cheveu humain comme un bon isolant.

Nous chargeons à nouveau l'électroscope et augmentons le nombre de cheveux dans notre main, leurs extrémités libres touchant simultanément le carton de l'électroscope. Nous observons 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. Nous pouvons alors classer cette quantité de cheveux comme un bon conducteur.

Des expériences comme celle-ci montrent que la section transversale d'un corps a une influence sur ses propriétés conductrices ou isolantes. Plus cette surface entre notre main et le carton de l'électroscope est grande, plus le temps nécessaire pour décharger l'électroscope sera court.

Dans cet ouvrage, nous n'aborderons pas plus en détail les aspects présentés dans les sections 6.6 et 6.7.

6.8 L'électrisation d'un conducteur par friction

Expérience 6.24

Nous avons vu dans l'expérience 2.11 qu'il est impossible de charger un métal par frottement tout en le tenant dans nos mains. Maintenant que nous avons découvert la distinction entre conducteurs et isolants, ainsi que le fait que le corps humain est un conducteur, nous pouvons essayer une variante de cette expérience. Après tout, il est possible que le métal ait acquis une charge lorsque nous l'avons frotté, mais cette charge aurait été immédiatement déchargée vers le sol par l'intermédiaire de notre corps. Cette nouvelle expérience nous permet de conclure que c'était effectivement le cas.

Cette fois-ci, nous soutenons le métal à l'extrémité d'un tube en PVC de 30 cm de long. Le métal peut être, par exemple, une bouilloire en aluminium. La bouilloire est soutenue à l'envers par son ouverture autour du tube en PVC. Nous chargeons un pendule électrique négativement et un autre positivement, comme dans la section 5.4. Ces deux pendules chargés sont maintenus séparés l'un de l'autre.

Nous tenons le tube avec nos mains, sans toucher le métal. Nous enveloppons un sac en plastique autour de l'autre main et frottons ce plastique contre une partie de la bouilloire. Tout en continuant à tenir le tube en PVC avec nos mains et sans toucher le métal, nous approchons ensuite la partie frottée de la bouilloire en aluminium des deux pendules de charges opposées, en empêchant comme toujours ces substances d'entrer en contact avec les disques en papier chargés des pendules. Nous rapprochons ensuite la partie frottée du sac en plastique des deux pendules de charges opposées, en évitant une fois de plus qu'elles n'entrent en contact. Grâce à l'attraction et à la répulsion exercées entre ces substances et les pendules, nous constatons que le plastique est devenu chargé négativement, tandis que la bouilloire en aluminium est devenue chargée positivement.

Expérience 6.25

Nous répétons les procédures de l'expérience 6.24. Mais nous considérons maintenant une partie non frottée du sac en plastique qui est éloignée de la partie frottée. Lorsque nous approchons la partie non frottée des deux pendules chargés, ceux-ci n'indiquent pas la présence d'une charge nette sur cette partie non frottée du plastique. En revanche, n'importe quelle partie de la bouilloire isolée affectera les pendules lorsque la bouilloire sera approchée de ceux-ci. Cela se produit que la partie de la bouilloire approchée des pendules soit proche ou éloignée de la partie frottée de la bouilloire. Autrement dit, toutes les parties de la bouilloire se comporteront comme si elles étaient chargées positivement.

Des expériences comme celle-ci montrent que nous pouvons électriser un conducteur par friction, à condition que celui-ci soit isolé pendant cette procédure.

La découverte que les métaux peuvent également être chargés par friction, à condition qu'ils soient bien isolés, n'a été faite que dans les années 1770.⁷

⁷[Hem80] et [Hei99, p. 252, note 10].

6.9 La conservation de la charge électrique

Expérience 6.26

Nous prenons un tube en PVC neutre, ainsi qu'un morceau de sac en plastique également neutre, comme dans les expériences 2.1, 3.1 et 4.5. Nous chargeons un pendule électrique négativement et un autre positivement, comme dans la section 5.4. Nous frottons ensuite le sac en plastique sur le tube en PVC. Nous approchons lentement la partie frottée du tube de chacun des pendules chargés, en évitant tout contact entre le tube et les deux pendules. Nous pouvons alors conclure qu'il est devenu négativement chargé, car il repousse le pendule négatif et attire le pendule positif. En approchant lentement la partie frottée du sac en plastique de chacun des pendules chargés, en évitant toujours tout contact entre eux, nous pouvons conclure que le sac en plastique est devenu positivement chargé.

Analysons maintenant les expériences de la section 5.4, ainsi que les expériences 6.24 jusqu'à 6.26. Elles montrent que lorsque nous frottons deux corps initialement neutres l'un contre l'autre, l'un d'eux acquiert une charge positive et l'autre une charge négative. Ce phénomène n'est facilement détectable que lorsque les deux corps sont des isolants. Lorsque l'un de ces corps est un isolant et l'autre un conducteur, la charge acquise par ce dernier est normalement déchargée vers le sol par l'intermédiaire de notre corps. Cela peut donner l'impression que la charge sur l'isolant est apparue de nulle part, car le conducteur s'est déchargé après le frottement. Afin d'observer la charge acquise par un conducteur lors du frottement avec un autre corps, il est essentiel d'isoler électriquement le corps conducteur. Lorsqu'il est isolé, la charge qu'il a acquise ne sera pas déchargée vers le sol, ce qui permettra d'observer ses propriétés.

L'expérience 6.25 montre également que la charge acquise par un isolant en raison du frottement ne se répartit pas dans tout l'isolant. Autrement dit, elle reste attachée à la zone frottée. En revanche, la charge acquise par un conducteur en raison du frottement se répartit rapidement sur toute la surface conductrice. Elle ne reste pas attachée à la zone frottée.

Dans les expériences suivantes, nous utilisons deux électroscopes de même taille. Nous supposons également qu'ils ont des bandes de même longueur et largeur, et de même sensibilité (c'est-à-dire avec la même mobilité angulaire par rapport à la verticale). Normalement, nous considérons également qu'ils sont chargés de manière égale. Cela peut être indiqué par l'angle des bandes par rapport à la verticale. Une fois qu'ils ont été chargés, nous ne devons pas les toucher avec notre corps afin d'éviter de les décharger. Lorsque nous devons les déplacer, il est préférable de les tenir par les supports en plastique.

Expérience 6.27

Nous chargeons de manière négative deux électroscopes avec la même quantité de charge, comme dans l'expérience 6.2. Nous les plaçons côte à côte dans le même plan, séparés par une petite distance. Après avoir soulevé les deux bandes et retiré la paille

frottée qui les a chargées, nous touchons les deux rectangles l'un contre l'autre. Nous observons que les deux bandes restent soulevées, figure 6.29. Elles restent toutes deux soulevées après que les deux électroscopes ont été séparés. Il en va de même lorsque nous chargeons les deux électroscopes avec des charges positives égales.

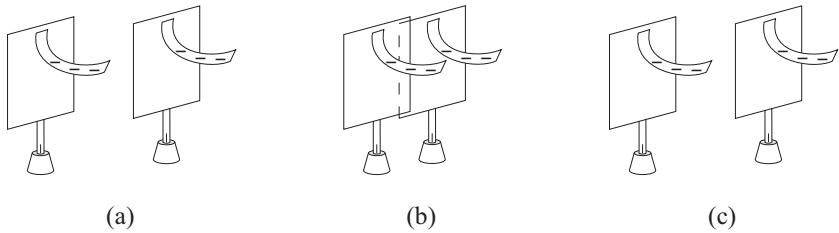


FIG. 6.29 : (a) Deux électroscopes chargés de charges de même signe. (b) Les cartons se touchent et rien ne se passe. (c) Après séparation, les bandes restent relevées.

Expérience 6.28

Nous chargeons un électroscope négativement, comme dans l'expérience 6.2, et l'autre électroscope positivement, comme dans l'expérience 6.8. Une fois les bandes levées, nous retirons les deux pailles frottées qui ont chargé les électroscopes. Les deux électroscopes sont placés dans le même plan, côte à côte, à une petite distance l'un de l'autre. Nous touchons ensuite les deux électroscopes. Cette fois, les deux bandelettes retombent immédiatement, reprenant leur orientation verticale naturelle, figure 6.30 (b)! Nous pouvons séparer les deux électroscopes et les bandes restent verticales. Cela indique que les deux électroscopes, initialement électrisés avec des charges opposées, ont été déchargés par contact mutuel. Cette expérience est l'opposé des expériences 6.24 et 6.26. Dans ces dernières expériences, nous avons deux corps qui étaient initialement neutres. Après les procédures expérimentales, ils se sont électrisés avec des charges de signe opposé. Dans la présente expérience, en revanche, nous avons deux électroscopes électrisés avec des charges de signe opposé. Après la procédure expérimentale, ils se sont neutralisés.

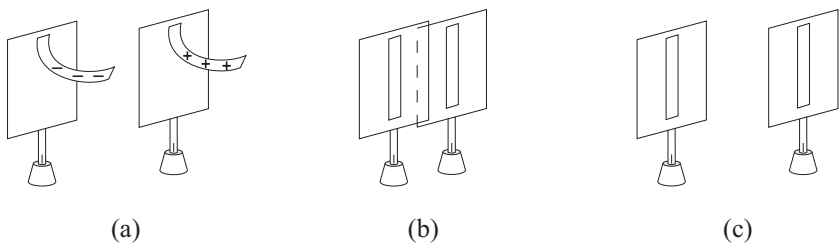


FIG. 6.30 : (a) Un électroscope positif et un électroscope négatif. (b) Après contact, les bandes tombent. (c) Après séparation, les bandes restent verticales, indiquant que les électroscopes sont désormais déchargés.

Expérience 6.29

Un seul électroscope est chargé négativement, comme dans l'expérience 6.2. Il doit avoir une charge suffisante. Cela est indiqué par un grand angle d'inclinaison de sa bande par rapport à la verticale, figure 6.31 (a). Nous plaçons un autre électroscope, initialement déchargé, sur le même plan vertical, à une petite distance latérale du premier. Nous mettons ensuite les deux électroscopes en contact l'un avec l'autre. Nous observons que l'angle de la bande du premier diminue, tandis que la bande de l'autre électroscope s'élève, figure 6.31 (b). Après séparation, les bandes restent inchangées. La quantité de charge d'un électroscope peut être indiquée par la hauteur de sa bande relevée. Cette expérience montre qu'un électroscope chargé perd une partie de sa charge lorsqu'il entre en contact avec un deuxième électroscope initialement non chargé, qui devient alors électrisé, figure 6.31 (c).

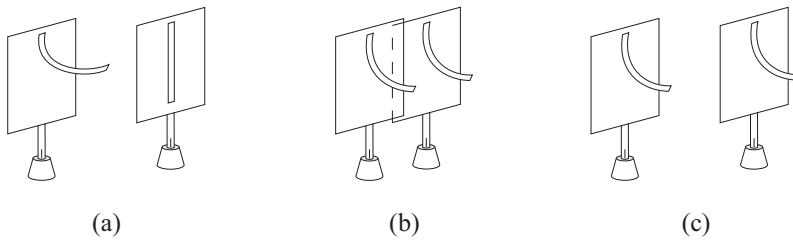


FIG. 6.31 : (a) Un électroscope chargé et un électroscope non chargé. (b) Contact entre les cartons. (c) Séparation après contact. Les bandes restent relevées, mais avec une inclinaison inférieure à celle de (a).

Lorsque nous séparons ces deux électroscopes, ils restent tous deux faiblement chargés. En approchant lentement une paille négative des deux bandes, nous pouvons conclure que les deux électroscopes sont désormais chargés négativement. L'inclinaison du premier électroscope a diminué au cours de cette expérience, tandis que celle du second a augmenté. Cela suggère, d'après l'expérience 6.9, qu'une partie de la charge négative initiale du premier électroscope a été transférée au second électroscope.

Le même effet se produit entre un électroscope chargé positivement et un électroscope initialement déchargé.

Expérience 6.30

Nous pouvons construire une variante des expériences 6.14 et 6.15. Les électroscopes *I* et *II* restent à une distance d'environ 15 cm l'un de l'autre. Les bandes restent à l'extérieur. Les électroscopes doivent être initialement déchargés, sans aucune connexion entre eux dans cette expérience. Après cette mise en place, nous chargeons l'électroscope *I* selon la procédure de l'expérience 6.2. La bande de l'électroscope *I* se lèvera, tandis que celle de l'électroscope *II* ne bougera pas, figure 6.32 (a). Après cette procédure, la paille chargée est retirée. Nous prenons maintenant une deuxième paille neutre. Elle doit être placée au-dessus des cartons des deux électroscopes et être soutenue par ceux-ci. Une fois placée à cet endroit, rien ne change. La languette de

l'électroscope *I* reste levée et celle de l'électroscope *II* pointée vers le bas, figure 6.32 (b).

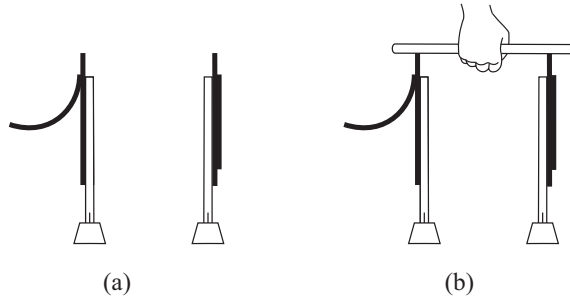


FIG. 6.32 : (a) L'électroscope *I* est chargé. (b) Une paille neutre est ensuite placée de manière à relier les deux électrosopes. Rien ne change lorsque cela est fait.

Expérience 6.31

L'expérience 6.30 est répétée. L'électroscope *I* est chargé alors qu'il n'y a aucune connexion entre les électrosopes, figure 6.33 (a).

Mais maintenant, les deux électrosopes ne seront pas reliés par une paille neutre. À la place, une paille en plastique est coupée de manière à avoir une longueur d'environ 10 cm. Une brochette en bois ou un fil de cuivre de 20 cm de long est inséré à travers celle-ci. Avec notre main, nous touchons uniquement la paille et plaçons les extrémités de la brochette de manière à ce qu'elle soit soutenue par les cartons. À présent, la bande de l'électroscope *I* descend légèrement, tandis que celle de l'électroscope *II* remonte légèrement, figure 6.33 (b). À la fin de la procédure, les deux bandes se trouveront à la même hauteur, mais plus bas que dans la situation illustrée à la figure 6.33 (a).

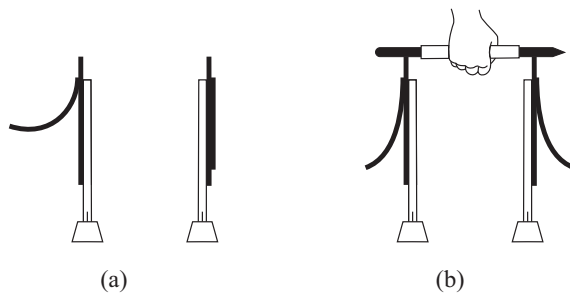


FIG. 6.33 : (a) Seul l'électroscope *I* est chargé. (b) Une brochette en bois est entourée d'une paille en plastique, le bois étant soutenu par les deux électrosopes. Nous observons que la bande *I* descend légèrement, tandis que la bande *II* remonte légèrement.

Deux précautions sont essentielles pour la réussite de cette expérience. La première est que nous ne devons pas toucher les cartons, la brochette en bois ou le fil métallique avec nos mains. La seconde est qu'il est mieux que la brochette ou le fil soit entouré de deux ou trois pailles en plastique, plutôt qu'une, car toutes les pailles ne sont pas de bons isolants. En conséquence, nous pouvons décharger l'électroscope *I* partiellement ou totalement à travers notre corps en plaçant la brochette sur les cartons. Les charges électriques de l'électroscope *I* iront vers la brochette, passeront à travers la paille, puis se déchargeront à travers notre corps. En plaçant deux ou trois pailles les unes dans les autres, nous augmentons l'isolation du système. Si vous rencontrez des difficultés pour emboîter les pailles les unes dans les autres, vous pouvez utiliser n'importe quel autre isolant que vous avez trouvé pour soutenir la brochette en bois (voir la sous-section 6.3.2).

Dans l'expérience 6.30, il n'y a pas eu de transfert de charge électrique entre les électroscopes *I* et *II* lorsqu'ils sont reliés par une paille en plastique. En revanche, dans l'expérience 6.31, nous observons que lorsque l'électroscope *I* perd un peu de sa charge, l'électroscope *II* en gagne.

Ces expériences illustrent qualitativement la conservation des charges électriques. Lorsque deux corps conducteurs de même taille et de même forme, chargés de manière égale, se touchent, ils ne se déchargent pas. En revanche, lorsqu'ils sont chargés de manière opposée, les deux conducteurs se déchargent mutuellement et restent neutres après le contact. Si un seul d'entre eux est initialement chargé, le contact avec le second conducteur déclenche un transfert de charge du corps électrisé vers le corps neutre. À la fin de ce processus, les deux conducteurs deviennent électrisés avec des charges de même signe.

6.10 Gray et la conservation des charges électriques

Gray fut peut-être le premier à remarquer expérimentalement ce genre d'effets en 1735. Il suspendit un garçon à des fils de soie afin que celui-ci puisse se coucher en position ventrale. D'un côté du garçon se tenait un homme debout sur un support isolant fait de gomme laque⁸ et de résine. De l'autre côté du garçon se tenait un deuxième homme tenant un « fil pendulaire ». Il s'agissait d'une sorte d'électroscope inventé par Gray. Il s'agissait probablement d'un simple fil de lin ou de coton attaché à un bâton en bois. Comme il s'agissait d'un fil conducteur, il était attiré par un corps chargé à proximité (le garçon dans cet exemple). L'angle d'inclinaison du fil pendulaire par rapport à la verticale serait un indicateur du degré d'électrisation du corps à proximité. Gray avait déjà mentionné ce type d'électroscope auparavant.⁹ Le deuxième homme dans l'expérience de Gray était probablement en contact direct avec le sol, n'étant pas isolé. Gray frotta un tube de verre avec ses mains et l'approcha des pieds du garçon. Après cette procédure, le garçon attira le fil de l'électroscope qui était tenu par le deuxième homme. Le garçon approcha ensuite son doigt de l'homme debout sur la résine. Il y eut une décharge électrique et le garçon perdit une partie de son pouvoir d'attraction

⁸Voir l'annexe A.

⁹[Gra31b, p. 228], [Gra31c, p. 289], et [Gra35b, pp. 167–168]. Voir également la section 4.9.

(comme l'indique la diminution de l'angle d'inclinaison de l'électroscope). Au même moment, l'homme debout sur la résine s'est électrisé, attirant le fil de l'électroscope.

Nous citons les passages pertinents de cette expérience cruciale :^{10,11}

Le 6 mai [1735], nous avons réalisé l'expérience suivante. Le garçon étant suspendu à des fils de soie, et le tube [en verre frotté] étant placé près de ses pieds comme d'habitude, il a tenu le bout de son doigt près de la main d'un gentleman qui se tenait debout sur un gâteau fait de laque et de colophane noire ; au même moment, un autre gentleman se tenait de l'autre côté du garçon avec le fil suspendu ; on demanda alors au garçon de tenir son doigt près de la main du premier gentleman, sur laquelle il fut piqué, et un bruit sec se fit entendre ; en même temps, le fil, qui était attiré vers le garçon, retomba, le garçon ayant perdu une grande partie de son attraction, et lorsqu'un deuxième gentleman approcha son doigt de la main du gentleman, l'attraction cessa ; ensuite, le fil étant tenu près de ce monsieur, on constata qu'il attirait très fortement ; mais après avoir répété cette expérience, je constate que, bien que l'attraction du garçon soit beaucoup diminuée, il ne la perd pas complètement avant d'avoir appliqué 2, 3, et parfois 4 fois son doigt sur la main de celui qui se tient sur le corps électrique, mais sans le toucher.

L'idée de conservation de la charge était implicitement présente dans les conceptions de plusieurs scientifiques qui travaillaient sur l'électricité. Gray nous offre la première expérience démontrant ce fait de manière qualitative. Benjamin Franklin (1706–1790) fut l'un des premiers à explorer avec succès le concept de conservation de la charge entre 1745 et 1747.¹²

6.11 Une brève histoire de l'électroscope et de l'électromètre

La plus ancienne méthode pour déterminer si un corps était chargé ou neutre consistait à le rapprocher de substances légères, comme dans l'expérience sur l'effet de l'ambre. Plus tard, des instruments plus sensibles ont été mis au point pour détecter cette propriété des corps : le perpendiculaire de Fracastoro, le versorium de Gilbert et le fil pendulaire de Gray. Dans tous ces cas, il était nécessaire de réduire la distance entre le corps frotté et l'un de ces instruments afin d'observer comment l'instrument réagissait à la présence du corps, qu'il s'agisse d'un morceau d'ambre ou d'une paille en plastique.

¹⁰ [Gra35b, p. 168].

¹¹ May the 6th [of 1735], we made the following Experiment. The Boy being suspended on the Silk Lines, and the [rubbed glass] Tube being applied near his Feet as usual, upon his holding the End of his Finger near a Gentleman's Hand, that stood on a Cake made of Shell Lack and black Rosin ; at the same time another Gentleman stood at the other side of the Boy with the pendulous Thread ; then the Boy was bid to hold his Finger near the first Gentleman's Hand, upon which it was prick'd, and the snapping Noise was heard ; and at the same time, the Thread which was by its attraction going towards the Boy fell back, the Boy having lost a great part of his attraction, upon a second moving his Finger to the Gentleman's Hand, the attraction ceased ; then the Thread being held near that Gentleman, he was found to attract very strongly ; but having since repeated this Experiment, I find that though the attraction of the Boy is much diminished, yet he does not quite lose it, till 2, 3, and sometimes 4 applications of his Finger to the hand of him that stands on the Electric Body, but without touching him.

¹² [Hei99, pp. 327–333].

En général, il n'y a pas de différence visible entre un corps neutre et un corps chargé. Un morceau d'ambre, par exemple, ne change ni de couleur ni de forme lorsqu'il est chargé. En général, nous ne pouvons détecter s'il est chargé ou non que par les effets qu'il provoque sur les substances proches ou sur un instrument sensible placé à proximité. Lorsqu'un pendule électrique est éloigné d'autres corps, il pend verticalement, qu'il soit chargé ou non. Ce n'est que lorsque nous l'approchons d'autres substances que nous pouvons détecter, grâce à l'angle de la ficelle du pendule par rapport à la verticale, si le pendule est chargé ou neutre.

Dans cet ouvrage, nous appelons électroscope un instrument qui, lorsqu'il est connecté à un corps, indique automatiquement si ce corps est chargé ou non. Il doit indiquer cette électricité automatiquement, de manière à ce que nous n'ayons pas besoin de toucher l'électroscope ni d'effectuer aucune autre procédure. Même lorsque cet instrument n'est connecté à aucun autre corps, il est possible de savoir si l'électroscope lui-même est chargé ou non. À cet égard, l'électroscope est un instrument différent du versorium et du pendule électrique.

Un instrument doit posséder deux propriétés principales pour être qualifié d'électroscope. (I) La première est que l'électroscope doit être isolé électriquement du sol. À défaut, le corps auquel l'électroscope est fixé doit être isolé du sol. Cette isolation électrique est essentielle. Sans cette propriété, l'électroscope ne peut pas conserver sa charge acquise. En ce qui concerne les électroscopes utilisés dans cet ouvrage, cette isolation est réalisée en soutenant le carton fin à l'aide de la paille en plastique neutre. (II) La deuxième propriété est que l'électroscope doit avoir une partie visible qui change d'état selon que l'électroscope est neutre ou chargé. Dans les électroscopes présentés dans cet ouvrage, cette propriété est l'angle entre la bande de papier mobile et le carton fin fixe. Dans les électroscopes classiques, cet état est indiqué par l'angle entre les deux bandes mobiles.

Le premier électroscope présentant ces deux propriétés a peut-être été construit par Du Fay en 1737.¹³ Avant Du Fay, Gray avait déjà utilisé un fil de coton ou de lin attaché à un bâton afin d'indiquer si un corps proche était chargé. Mais pour indiquer la charge du corps proche, il fallait approcher le bâton du corps et observer si le fil s'inclinait vers le corps. Du Fay, quant à lui, a commencé à suspendre des fils pliés au milieu au-dessus du corps. Lorsque ce corps était chargé, les deux moitiés de chaque fil s'éloignaient l'une de l'autre, formant une lettre *V* à l'envers. L'angle de séparation entre les deux moitiés augmentait avec la quantité de charge sur le corps. Dans la première expérience dans laquelle il décrit cette nouvelle procédure,¹⁴ il suspendit une barre de fer à l'horizontale à l'aide de cordes en soie. Ces cordes isolaient la barre du sol. Sur la barre, il suspendit plusieurs fils de même longueur mais faits de différentes matières : lin, coton, soie et laine. Chaque fil était plié en son milieu, ses points centraux étant soutenus par la barre. Après avoir électrisé la barre, il remarqua que les deux moitiés de chaque fil s'éloignaient l'une de l'autre. De plus, l'angle de séparation était plus grand pour le fil de lin, suivi du coton, de la soie et de la laine, qui présentait le plus petit angle de séparation. Il pensait que ce fait indiquait que le lin avait une plus grande capacité à accumuler de la matière électrique que les autres substances.

¹³[DF37b, pp. 94–98].

¹⁴[DF37b, pp. 95–96].

Il a ensuite présenté la description extrêmement intéressante suivante :¹⁵

Une aiguillée de fil posée sur une barre de fer suspenduë par des cordons de soie, présente l'idée de la plus simple de toutes les expériences, cependant elle peut fournir de sujet à des méditations profondes, & elle sert à confirmer la plûpart des principes que j'ai établis dans mes Mémoires précédents, tant sur la communication de l'électricité & ses effets de répulsion & d'attraction, que sur la réalité des deux genres d'électricité, sçavoir la Vitree & la Résineuse. Elle sert aussi à connoître si la force de l'électricité est plus ou moins grande, ce qui est très-commode dans la pratique de toutes ces expériences; il ne s'agit pour cela que de poser sur la barre le bout de fil, comme nous l'avons dit, on verra pour lors les deux bouts qui pendent librement d'un côté & de l'autre de la barre s'écarter l'un de l'autre avec plus ou moins de force, & former un angle plus ou moins grand, suivant que la barre aura reçu du tube [en verre frotté] plus ou moins de vertu électrique [Une illustration d'une expérience de ce type figure à la figure 6.34], & cela fera connoître d'une manière assés exacte, le degré de force de l'électricité, de sorte que l'on pourra choisir le temps & les circonstances les plus favorables pour les expériences qui demandent la plus forte électricité, telles que sont celles qui concernent la lumière, ou la communication le long d'une corde ou d'un autre corps continu.

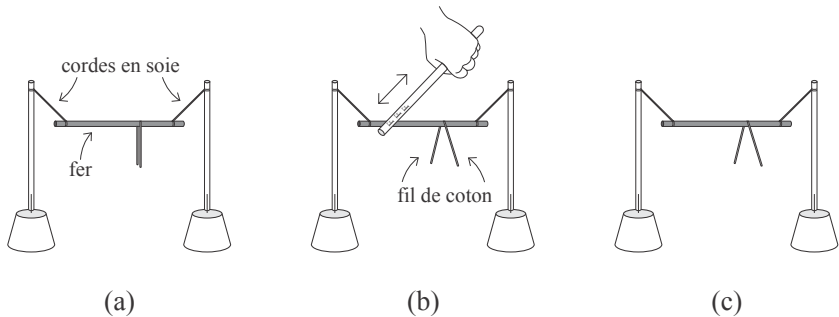


FIG. 6.34 : L'électroscope de Du Fay. (a) Tige de fer soutenue par des cordes en soie. Un fil de coton est suspendu à la barre. (b) Un tube de verre frotté est raclé contre la barre. (c) Lorsque nous retirons le verre, les deux moitiés du fil de coton s'éloignent l'une de l'autre.

L'expérience de Du Fay est analogue à notre expérience 6.9, représentée par la figure 6.12. En augmentant la quantité de charge sur l'électroscope, nous augmentons l'angle de séparation des feuilles.

Du Fay a également utilisé son électroscope pour découvrir quels corps sont les meilleurs isolants. Pour ce faire, il a suspendu une barre de fer à des fils faits de différentes substances, ou a posé la barre de fer sur des corps solides faits de différents matériaux. Après cette préparation, il a chargé la barre de fer à l'aide d'un tube de verre préalablement frotté. Il a ensuite noté, en observant l'angle de son électroscope

¹⁵[DF37b, p. 98].

relié à la barre, quelle substance permettait à la barre de rester chargée plus longtemps. Cette substance (les fils auxquels la barre était suspendue ou le support rigide sous la barre la maintenant au-dessus du sol) était alors le meilleur isolant.¹⁶

Jean Antoine Nollet (1700–1770), figure 6.35, fut l'assistant de Du Fay pendant quelques années, de 1731 ou 1732 à environ 1735.¹⁷



FIG. 6.35 : Jean Antoine Nollet (1700–1770).

En 1747, Nollet présenta une amélioration de l'électroscope de Du Fay. Les fils ouverts, en forme de lettre V inversée, étaient directement reliés au corps chargé. Une lampe éclairait les fils et projetait leur ombre sur un écran gradué où il pouvait lire directement l'angle formé par les fils. Cela permettait une grande précision dans la détermination de ces angles, car l'écran et l'observateur pouvaient être éloignés de l'électroscope afin de ne pas affecter la lecture, figure 6.36.¹⁸

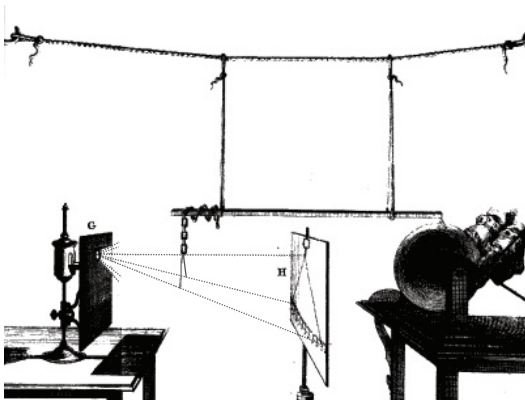


FIG. 6.36 : L'électromètre de Nollet.

Nollet a donné un nom à cet instrument : l'« électromètre » :¹⁹

¹⁶[DF37b, p. 99].

¹⁷[Hei81e] et [Hei99, pp. 279–289].

¹⁸[Nol47, p. 129] et [Hei99, p. 353].

¹⁹[Nol47, p. 129]

Dans bien des occasions je me suis servi, pour connoître les progrès de l'électricité, d'un moyen assez simple & qui méritoit le titre d'*électromètre*, s'il étoit généralement applicable, & s'il pouvoit servir à mesurer par des quantités bien connues, & dont on ne pût douter, les augmentations ou diminutions qu'il indique.

Ce nom est approprié, car cet instrument permet de mesurer quantitativement un angle. Et la valeur de cet angle est liée à l'électricité du corps auquel il est connecté. L'électromètre est un électroscope qui permet de mesurer avec précision une propriété quantitative, telle que l'angle dans le cas présent, associée à l'électricité.

Un autre exemple de ses électromètres est présenté dans la figure 6.37.²⁰

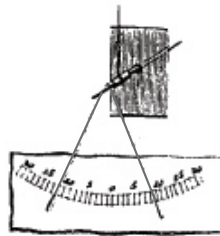


FIG. 6.37 : Un autre électromètre fabriqué par Nollet.

Pour éviter les pertes d'électricité aux extrémités des fils de tout électroscope, ceux-ci ont ensuite été terminés par de petites boules légères fabriquées à partir de moelle de sureau ou de liège. L'un des scientifiques à l'origine de cette innovation était John Canton, en 1752–1754.²¹ La figure 6.38 présente l'électroscope de Canton.

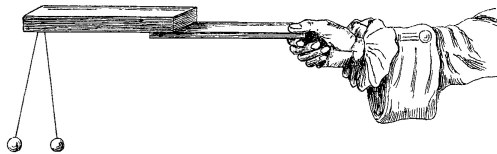


FIG. 6.38 : L'électroscope de Canton.

Plus tard, les fils de lin ont été remplacés par des pailles rigides et des feuilles métalliques. Elles étaient plus durables et permettaient une détermination plus précise de l'angle d'ouverture. Abraham Bennet (1750–1799) et Alessandro Volta (1745–1827) ont été des scientifiques importants qui ont contribué à ces développements. L'électromètre de Bennet, avec ses deux lamelles de feuille d'or, est représenté dans la figure 6.39.²²

Georg Wilhelm Richmann (1711–1753) a créé entre 1744 et 1753 un électromètre dans lequel l'une des pailles est fixe par rapport au sol et seule une seule paille ou

²⁰ [Nol67, Planche 4, Figure 15].

²¹ [Can53a], [Can53b] et [Wal36].

²² [Ben87] et [Hei99, p. 450].

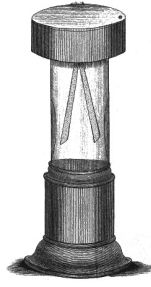


FIG. 6.39 : L'électromètre de Bennet.

bande s'éloigne de la verticale lorsque l'électroscope est chargé, figure 6.40.²³ Ceci est analogue à l'électroscope de la figure 6.1 qui est utilisé dans la plupart des expériences de ce livre.

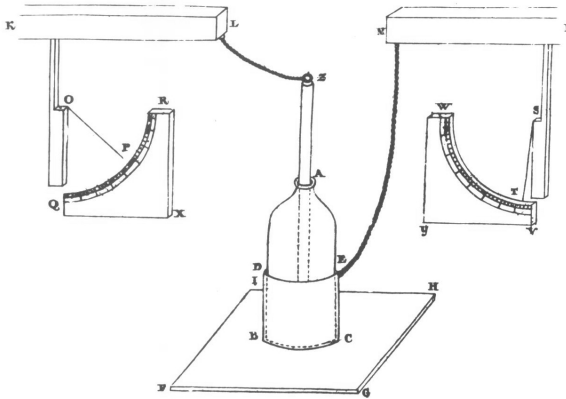


FIG. 6.40 : Les électromètres de Richmann connectés à une bouteille de Leyde. Chacun des électromètres est équipé d'une seule bande mobile.

Ce type d'électromètre a été développé plus tard par William Henley (date de naissance inconnue, décédé en 1779) en 1772, figure 6.41.²⁴ Il comporte une seule tige mobile légère *A*, avec une boule de liège à son extrémité, conçue pour pivoter autour du centre *B*. Lorsque l'électromètre est chargé, il y a une répulsion entre la tige mobile *A* et la tige fixe *C*. L'angle d'ouverture peut être lu sur le rapporteur relié à l'instrument.

Pour plus de détails sur l'histoire de l'électroscope et de l'électromètre, voir les travaux de Walker, Heilbron et Medeiros.²⁵

²³ [Hei99, p. 392].

²⁴ [Pri72].

²⁵ [Wal36], [Hei99, pp. xvi, xx, 82, 259, 327, 331, 353, 367, 373–376, 390–392, 418, 421–422, 447–456, 462 et 491–494] et [Med02].

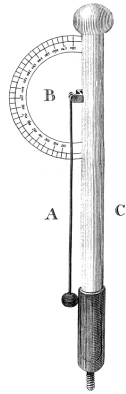


FIG. 6.41 : L'électromètre de Henley.

Chapitre 7

Les différences entre les conducteurs et les isolants

7.1 La mobilité des charges sur les conducteurs et les isolants

Nous avons vu que la principale propriété d'un isolant comme le plastique est qu'il ne laisse pas passer un flux de charges électriques. Par conséquent, il ne décharge pas un électroscope chargé. Un conducteur, en revanche, permet le passage de charges à travers lui. Le corps humain, le sol, un métal, une feuille de papier ou le carton fin d'un électroscope sont des exemples de conducteurs. Par conséquent, lorsqu'un électroscope chargé est connecté au sol par un conducteur, il se décharge. Nous allons maintenant examiner d'autres propriétés qui distinguent les conducteurs et les isolants.

Expérience 7.1

Nous découpons une bande rectangulaire de carton fin, de 30 cm de long et 2 cm de large. Le plan de la bande sera vertical, avec son côté le plus long parallèle à l'horizon. Nous fixons l'extrémité supérieure d'une paille en plastique verticale au centre de la bande, formant ainsi une lettre *T*. L'extrémité inférieure de la paille doit être fixée à un support approprié, comme de la pâte à modeler ou le support du pendule électrique, comme dans la section 4.4. Nous suspendons ensuite quatre bandes très fines de papier de soie, de 10 cm de long, réparties le long de la bande de carton fin. Elles doivent être pliées au milieu, de manière à ce que les deux moitiés soient suspendues côte à côte verticalement. Après ce procédé, nous frottons une autre paille en plastique. Elle doit être raclée une ou plusieurs fois sur le carton fin horizontal, afin de le charger. Nous retirons la paille frottée. Les extrémités de chacune des bandes de papier de soie se séparent, chaque moitié s'éloignant de l'autre.

La même expérience peut être répétée avec une bande de carton fin plus grande, par exemple de 60 cm de long. Pour ce faire, nous pouvons fixer deux pailles en

plastiques verticales équidistantes, l'une à une distance de 20 cm d'une extrémité du carton, et l'autre à une distance de 20 cm de l'autre extrémité. Nous étendons plusieurs bandes très fines de papier de soie sur le bord horizontal supérieur de la large bande de carton fin, comme plusieurs électroscopes. Lorsque nous chargeons le carton fin en le raclant avec une paille frottée, les extrémités de chacune des fines bandes de papier de soie se séparent. Au lieu d'une bande de carton fin rectangulaire, nous pouvons également utiliser un fil de cuivre dur.

Nous construisons maintenant un T de mêmes dimensions, mais uniquement en plastique. La partie supérieure horizontale du T peut être une règle en plastique (avec son plan vertical) ou une série de pailles en plastique reliées les unes aux autres par leurs extrémités adjacentes. Nous suspendons les fines bandes de papier de soie au-dessus de la partie supérieure du T , réparties sur toute sa longueur. Nous frottons une autre paille en plastique et la raclons sur le bord supérieur du T en plastique. Dans ce cas, les extrémités des fines bandes de papier de soie ne se séparent pas, à l'exception de celles qui sont proches de la zone raclée.

Expérience 7.2

Nous découpons un disque de carton fin d'un diamètre de 20 cm. Le disque restera à l'horizontale, soutenu par des pailles en plastique placées verticalement à des endroits appropriés sous celui-ci. À l'aide d'une paire de ciseaux ou d'une pince perforatrice à un seul trou, nous réalisons plusieurs paires de trous le long du diamètre du disque, les deux trous de chaque paire étant très proches l'un de l'autre. Nous passons ensuite une seule bande de papier de soie fin à travers chaque paire de trous de manière à ce qu'elle pende au milieu, chaque moitié passant à travers un trou et faisant face à l'autre moitié. Une autre possibilité consiste à fixer les bandes comme une lettre L collée sur la partie inférieure du disque. Deux bandes côte à côte formeront une lettre T , dont la partie verticale sera composée de deux bandes suspendues verticalement côte à côte au disque. Nous frottons une autre paille en plastique et la raclons le long d'un bord du disque. Les couples de bandes de papier de soie se séparent. Cela se produit également pour les couples de bandes situés loin de la zone qui a été raclée.

Le même effet ne se produit pas avec un disque en plastique. Dans ce cas, les couples de bandes de papier de soie éloignés de la zone raclée ne se séparent pas après que le disque en plastique ait été raclé avec une paille frottée. Seules ceux qui sont proches de la zone raclée se séparent.

Ces expériences montrent que lorsque nous chargeons un conducteur, les charges ont tendance à se répartir sur toute sa surface. Dans un isolant, en revanche, elles ne se déplacent pas librement le long de sa surface, restant attachées à l'endroit où elles ont été générées ou transférées vers l'isolant. Le même effet avait été observé dans l'expérience 6.25.

7.2 Les collecteurs de charge

Notre prochain instrument électrique est un collecteur de charge. Il sert à obtenir une petite quantité de charge à partir de n'importe quelle région d'un corps électrisé. En déplaçant cette charge collectée à proximité de pendules précédemment chargés positivement et négativement, ou d'électroscopes précédemment chargés, il est possible de déterminer le signe de la charge collectée. L'intensité des attractions et des répulsions générées sur les pendules et les électroscopes indique également si la charge collectée est importante ou faible. Bien qu'un pendule électrique ou un électroscope puisse également être utilisé comme collecteur de charge, nous utiliserons ce terme pour désigner les instruments spécialement conçus à cet effet. Un collecteur de charge peut également servir à transporter la charge entre deux conducteurs séparés dans l'espace.

Le collecteur le plus simple est une boule de feuille d'aluminium suspendue à l'extrémité d'un fil de soie ou de nylon, l'autre extrémité étant attachée à une paille en plastique, figure 7.1. La boule peut également être fabriquée en papier ou en un autre conducteur approprié. La soie étant un isolant, elle empêche toute décharge de l'électricité collectée. En augmentant le diamètre de la sphère, nous augmentons la quantité de charge qu'elle collectera dans n'importe quelle expérience.

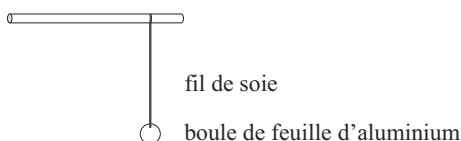


FIG. 7.1 : Un collecteur de charge.

Un deuxième modèle analogue au précédent est composé d'une boule en feuille d'aluminium fixée à l'extrémité d'une paille en plastique, figure 7.2. La principale différence avec le modèle précédent réside dans la rigidité de la paille. Celle-ci permet en effet de collecter les charges situées sur le dessus ou les côtés des conducteurs chargés, en tenant la paille par le dessous ou sur le côté. Nous pouvons ainsi mieux contrôler l'endroit où nous transportons la boule de feuille d'aluminium.

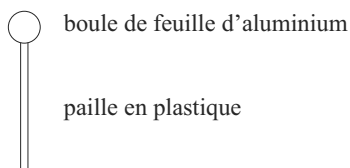


FIG. 7.2 : Un autre collecteur de charge.

Un autre modèle est composé d'une bande de feuille d'aluminium fixée à l'extrémité d'une paille en plastique. Cette bande peut mesurer, par exemple, 5 cm de long et 2 mm de large. Nous la collons autour de l'extrémité de la paille, figure 7.3.

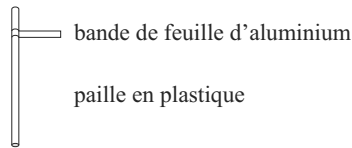


FIG. 7.3 : Un troisième modèle de collecteur de charge.

Le plus ancien collecteur de charge construit exclusivement à cette fin a peut-être été fabriqué par F. U. T. Aepinus (1724–1802). Il n'existe aucun portrait connu d'Aepinus.¹ Son collecteur de charge était simplement un petit morceau de métal d'environ 3,8 cm de long muni au milieu d'un petit crochet auquel il attachait un fil de soie bien séché. Il a décrit cet instrument et plusieurs expériences intéressantes réalisées avec celui-ci dans un ouvrage publié en latin en 1759, « Essai sur la théorie de l'électricité et du magnétisme ».²

Un autre modèle fut inventé par Charles Augustin Coulomb (1736–1806) en 1787, et fut appelé « plan de preuve », figure 7.4.³ Coulomb connaissait les travaux d'Aepinus et les a cités dans ses articles.

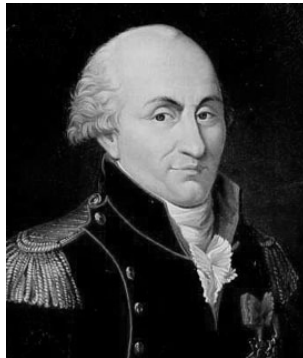


FIG. 7.4 : Charles-Augustin Coulomb (1736–1806).

Le plan de preuve est un disque conducteur fixé par son centre à une poignée isolante. Coulomb l'a utilisé 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 que nous utilisons ici est un disque en carton fin de 3 cm de diamètre. Nous pouvons placer de la feuille d'aluminium sur l'une de ses faces, mais cela n'est pas indispensable. Nous coupons 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

¹[Aep79, p. 62].

²[Aep79, pp. 312–314].

³[Hei99, p. 495]. Les principaux travaux de Coulomb sur la torsion, l'électricité et le magnétisme ont récemment été traduits en portugais et en anglais, [Ass22] et [AB23].

modeler, figure 7.5. Lorsque nous manipulons le plan de preuve, nous devons toucher uniquement la paille, mais pas la pâte à modeler ni le disque.

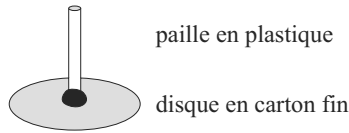


FIG. 7.5 : Le plan de preuve de Coulomb. Il s'agit également d'un collecteur, mais il sera appelé « plan de preuve » pour plus de clarté lors de la description des expériences suivantes.

Ces collecteurs de charge seront utilisés dans certaines des expériences décrites ci-dessous.

7.3 La polarisation électrique des conducteurs

Expérience 7.3

Nous avons vu dans l'expérience 6.12 que le carton fin est un conducteur, tandis que le plastique est un isolant. Nous utilisons cette propriété pour construire un conducteur isolé : un disque horizontal en carton fin de 15 cm de diamètre est soutenu par quatre pailles en plastique verticales fixées à des supports appropriés, tels que les supports des pendules électriques. Nous plaçons trois plans de Coulomb sur le dessus du disque, alignés le long d'un diamètre du disque, l'un au centre et les deux autres près des bords opposés. Nous les appelons 1, 2 et 3, le deuxième plan de Coulomb étant au centre du disque. Au départ, nous touchons le disque avec notre doigt afin de le décharger. Nous commençons maintenant l'expérience pour étudier la distribution des charges sur ce disque en présence d'autres corps chargés à proximité. Pour ce faire, nous chargeons d'abord deux électroscopes, l'un positivement et l'autre négativement. Nous les plaçons loin l'un de l'autre et loin de ce disque horizontal. Nous utiliserons également un troisième électroscope déchargé.

Nous chargeons une paille négativement sur toute sa longueur en la frottant dans des cheveux. Elle doit ensuite être placée verticalement sur un support approprié. Le milieu de cette paille doit se trouver à la même hauteur que le plan horizontal du disque. La paille frottée est approchée du disque, sans le toucher, près du plan de preuve 1, figure 7.6. Ils se trouveront alors dans l'ordre suivant : paille négative, plans de preuve 1, 2 et 3, respectivement. La paille négative doit se trouver à environ 2 cm du bord le plus proche du disque. Nous retirons le plan de preuve 2 et le rapprochons de l'électroscope déchargé. Rien ne se passe, ce qui indique qu'il est électriquement neutre. Nous pouvons le remettre à sa place initiale. Nous retirons maintenant le plan de preuve 1 et l'approchons lentement de l'électroscope déchargé, sans le toucher. La bande de cet électroscope est attirée par ce plan de preuve, ce qui indique que le plan de preuve est chargé. Nous l'approchons ensuite lentement des électroscopes négatif et positif, en veillant comme toujours à ce qu'ils n'entrent pas en contact. Le plan de preuve chargé attire la bande de l'électroscope négatif et repousse la bande de

l'électroscope positif. À partir de ces faits, nous concluons que le plan de preuve 1 s'est chargé positivement en raison de la présence de la paille négative à proximité. Nous le remettons ensuite à son emplacement d'origine au-dessus du disque horizontal. Nous retirons maintenant le plan de preuve 3 et répétons ces procédés, concluant qu'il s'est chargé négativement.

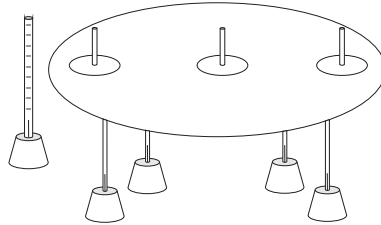


FIG. 7.6 : Expérience visant à montrer la répartition des charges sur un conducteur en présence de corps électrisés à proximité.

Expérience 7.4

Nous répétons l'expérience 7.3, mais cette fois-ci, nous plaçons la paille chargée négativement à environ 5 cm du bord le plus proche. Une fois de plus, cette paille négative est alignée avec les plans de preuve de Coulomb dans l'ordre suivant : paille négative, plans de preuve 1, 2 et 3, respectivement. Lorsque nous effectuons le procédé précédent, nous ne trouvons aucune charge sur le plan de preuve 2 de Coulomb. Le plan de preuve 1 s'avère à nouveau chargé positivement, mais avec une quantité de charge inférieure à celle du plan de preuve 1 de l'expérience 7.3. Cela est indiqué par les forces d'attraction et de répulsion qu'il exerce respectivement sur les électroscopes négatifs et positifs. Ces forces sont moins intenses dans la présente expérience que les forces analogues exercées par le plan de preuve 1 dans l'expérience 7.3. Après avoir replacé ce premier plan de preuve à son emplacement d'origine au-dessus du disque, nous retirons le plan de preuve 3 et testons sa charge. Une fois de plus, il s'avère être chargé négativement, mais avec une charge plus faible que le plan de preuve 3 de l'expérience 7.3. Cela est indiqué par les forces répulsives et attractives plus faibles qu'il exerce respectivement sur les électroscopes négatif et positif.

Nous pouvons répéter l'expérience 7.3, en plaçant à chaque fois la paille négative plus loin du disque. Plus elle est éloignée, plus la quantité de charges opposées collectées par les plans de preuve 1 et 3 est faible. Lorsque la paille négative est à 20 cm du bord le plus proche du disque, ou même plus loin, aucune charge détectable n'est collectée par les plans de preuve dans ces expériences.

Expérience 7.5

Nous répétons l'expérience 7.3. Nous observerons les forces exercées par les plans chargés sur les électroscopes neutres, positifs et négatifs lorsque la paille négative se trouve à environ 2 cm du bord du disque.

Nous plaçons ensuite 2 ou 3 pailles chargées négativement les unes à côté des autres, chacune sur son propre support. Leurs extrémités peuvent également être attachées ensemble et toutes placées côte à côte sur un seul support. Cet ensemble de 2 ou 3 pailles doit être placé à nouveau à environ 2 cm du bord du disque. Les pailles doivent avoir approximativement la même charge, car elles ont été frottées avec des cheveux pendant un temps égal. Nous répétons l'expérience 7.3 et observons que le plan de preuve 1 est à nouveau chargé positivement, comme auparavant. Mais il exerce désormais une force d'attraction beaucoup plus importante sur la bande de l'électroscope neutre que la force d'attraction exercée par le plan de preuve 1 de l'expérience 7.3. Il exerce également une force d'attraction plus importante sur la bande de l'électroscope négatif et une force de répulsion plus importante sur la bande de l'électroscope positif. Pour cette raison, nous concluons que ce plan de preuve a une charge plus importante que la charge collectée par le plan de preuve 1 dans l'expérience 7.3. Les intensités des forces exercées par le plan de preuve 3 sur les bandes des électroscopes dans cette expérience sont également supérieures aux forces analogues exercées par le plan de preuve 3 dans l'expérience 7.3. En conséquence, nous concluons qu'il a acquis une plus grande quantité de charge négative que le plan de preuve 3 dans l'expérience 7.3.

Expérience 7.6

Nous découpons un mince carton rectangulaire dont les côtés mesurent 10 cm et 7 cm. Il sera placé dans un plan vertical, le côté le plus long étant horizontal et le côté le plus court vertical. Nous fixons une paille verticale au centre du rectangle à l'aide de ruban adhésif. L'extrémité inférieure de la paille est fixée à un support approprié. Nous touchons ensuite le rectangle pour le décharger. Comme dans l'expérience 7.3, nous préparons à l'avance un électroscope chargé positivement et un électroscope chargé négativement. Dans cette expérience, nous utilisons une bande de feuille d'aluminium fixée à une paille en plastique comme collecteur de charge, comme dans la section 7.2, figure 7.3. Nous chargeons négativement une autre paille et la fixons verticalement à un support approprié. Les deux électroscopes chargés, le rectangle et la paille chargée sont initialement bien séparés les uns des autres.

Nous approchons maintenant la paille chargée de l'un des bords verticaux du rectangle, sans le toucher. Alors qu'ils sont très proches l'un de l'autre, à 1 ou 2 cm de distance, nous raclons la bande d'aluminium du collecteur de haut en bas sur l'autre bord vertical du rectangle, figure 7.7. Nous rapprochons ensuite cette bande des deux électroscopes chargés, sans les laisser entrer en contact. D'après les attractions et les répulsions observées dans ces électroscopes, nous concluons que la bande du collecteur est devenue chargée négativement.

Nous déchargeons cette bande en la touchant avec notre doigt. Nous la raclons maintenant de haut en bas sur le bord vertical du rectangle le plus proche de la paille chargée, en veillant à ne pas la laisser toucher la paille. Lorsque nous approchons lentement la bande des deux électroscopes chargés, nous concluons que la bande est désormais chargée positivement.

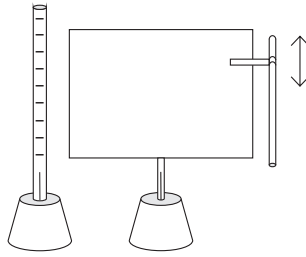


FIG. 7.7 : Étude de la répartition des charges sur un conducteur.

Expérience 7.7

Nous répétons l'expérience 7.6, mais cette fois-ci, nous plaçons la paille négative à environ 5 cm du bord le plus proche du rectangle. Lorsque nous répétons ce procédé, nous constatons à nouveau que le côté du rectangle le plus éloigné de la paille négative est devenu négativement chargé, tandis que le côté du rectangle le plus proche de la paille négative est devenu positivement chargé. Mais les quantités de charges collectées sont inférieures à celles collectées dans l'expérience 7.6. Ces quantités de charge peuvent être estimées à partir des forces exercées par la bande chargée sur les électroscopes positif et négatif.

Lorsque la paille négative est à 20 cm du bord le plus proche du rectangle, ou même plus loin, aucune quantité appréciable de charge n'est collectée par la bande métallique.

Expérience 7.8

Nous répétons l'expérience 7.6, mais cette fois-ci, nous plaçons 2 ou 3 pailles chargées négativement ensemble, comme dans l'expérience 7.5. Elles devraient avoir approximativement la même électrisation, car elles ont été frottées de manière égale avec des cheveux. Elles devraient se trouver à environ 1 ou 2 cm d'un côté du rectangle. Après avoir répété le même procédé que précédemment, nous constatons que la bande de feuille d'aluminium du collecteur a acquis une plus grande quantité de charges positives et négatives que les charges collectées dans l'expérience 7.6.

Ces expériences montrent que la présence de la paille frottée provoque une séparation des charges sur le conducteur voisin. La partie du conducteur qui est 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.

Définitions : Ce phénomène et ce processus sont appelés « polarisation électrique ou électrostatique », « induction électrique ou électrostatique », « influence électrique ou électrostatique », « polarisation par induction », « polarisation par influence », « électrisation par influence », « électrisation par induction » ou « électrisation par

communication ». Dans ce travail, nous utilisons de préférence la première expression, « polarisation électrique ».

Les expériences 7.4 et 7.7 nous en apprennent encore davantage. Nous pouvons augmenter la quantité de charges induites des deux côtés du conducteur en réduisant la distance entre le conducteur et la paille frottée. Ceci est représenté dans la figure 7.8.

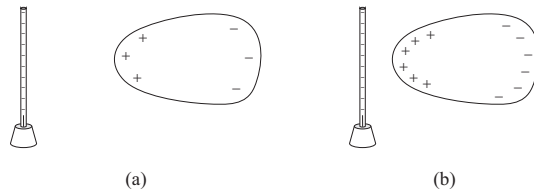


FIG. 7.8 : (a) La polarisation d'un conducteur due à la présence d'un isolant électrisé à proximité. (b) Lorsque nous réduisons la distance entre ces corps, la quantité de charges positives et négatives induites sur le conducteur augmente.

Revenons à l'expérience 4.5. L'inclinaison du pendule par rapport à la verticale augmente lorsque la distance entre la paille frottée et le pendule diminue. Cela indique une force plus importante entre les deux. D'après ce que nous venons de voir, nous pouvons augmenter la polarisation du disque en raccourcissant sa distance par rapport à la paille électrisée, figure 7.9.

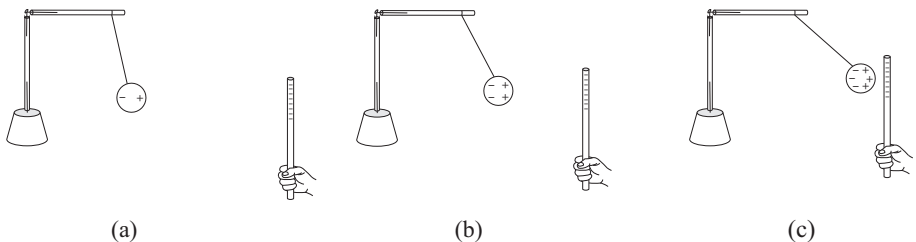


FIG. 7.9 : En réduisant la distance entre une paille frottée et un pendule, nous augmentons la polarisation des charges induites sur le disque conducteur.

Les expériences 7.5 et 7.8 montrent également quelque chose d'intéressant. Nous pouvons également augmenter la quantité de charges induites des deux côtés du conducteur en augmentant la quantité de charge sur l'isolant électrisé voisin, figure 7.10.

7.3.1 Aepinus et la polarisation électrique

L'un des scientifiques les plus importants qui s'est intéressé à ce sujet était Aepinus, entre 1755 et 1759.⁴ Une expérience analogue à l'expérience 7.3 a d'abord été réalisée par Aepinus, qui l'a décrite dans son ouvrage de 1759.⁵ La figure 7.11 présente une représentation de l'une de ses expériences.

⁴[Aep79], [Hei81a] et [Hei99, pp. 384–402].

⁵[Aep79, pp. 312–314].

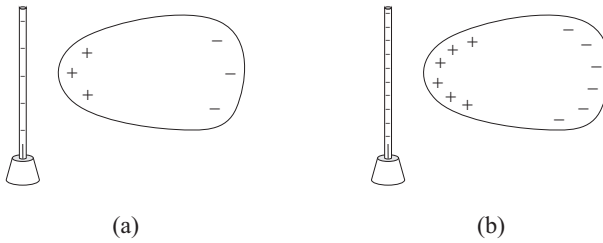


FIG. 7.10 : (a) La polarisation d'un conducteur due à un isolant électrisé situé à proximité. (b) Lorsque nous augmentons l'électrisation de l'isolant, la quantité de charges positives et négatives induites sur le conducteur augmente.

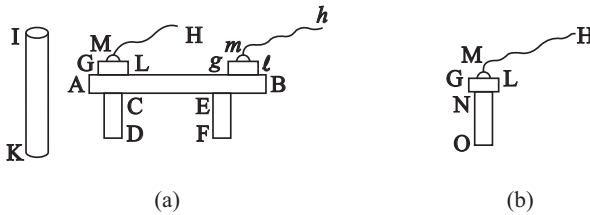


FIG. 7.11 : Expérience d'Aepinus visant à prouver la polarisation des conducteurs à proximité de corps électrisés.

Au lieu d'un disque en carton soutenu par des pailles en plastique, il disposait d'une tige métallique AB d'environ 30 cm de long sur des supports en verre isolants CD et EF , figure 7.11 (a). Ses collecteurs de charge ont été décrits dans la section 7.2. Il s'agissait de pièces métalliques GL et gl d'environ 3,8 cm de long, munies au milieu de petits crochets M et m auxquels étaient attachés des fils de soie bien séchés HM et hm . Pour les corps chargés, au lieu de notre paille frottée négativement, il utilisait le cylindre électrisant IK . Il pouvait s'agir d'un cylindre en verre électrisé positivement par frottement, ou d'un cylindre en soufre électrisé négativement par frottement.

Il a testé les charges induites aux extrémités de la tige métallique en raison de la présence de chaque cylindre. Il a ainsi prouvé la polarisation du conducteur. Pour ce faire, il a pris le cylindre électrisé par frottement, l'a approché de l'extrémité A de la tige, à une distance d'environ 2,5 cm, et l'a maintenu immobile à cet endroit. Il a ensuite soulevé la pièce métallique GL à l'aide du fil de soie HM et l'a placée sur le support en verre NO , figure 7.11 (b). Lorsqu'il a approché les corps positifs et négatifs de son collecteur de charge placé en NO , il a conclu que celui-ci avait acquis une charge de signe opposé à celle du cylindre électrisant. Lorsqu'il a effectué le même test avec l'autre collecteur de charge gl , il a conclu que celui-ci avait acquis une charge nette de même signe que le cylindre électrisant. Autrement dit, les extrémités A et B de la tige conductrice ont acquis des charges de signes opposés, la charge de B étant de même signe que le cylindre électrisant IK .

7.4 Les attractions et les répulsions exercées par un corps polarisé

Expérience 7.9

Dans cette expérience, nous utilisons le rectangle en carton fin de l'expérience 7.6, un pendule électrique et une paille en plastique. Nous déchargeons le rectangle et le pendule en les touchant avec notre doigt. Après ce procédé, nous les plaçons côte à côte sur le même plan, le pendule près du bord droit B du rectangle. La partie du disque la plus proche du rectangle doit se trouver à une distance de 2 à 5 cm de celui-ci, figure 7.12 (a).

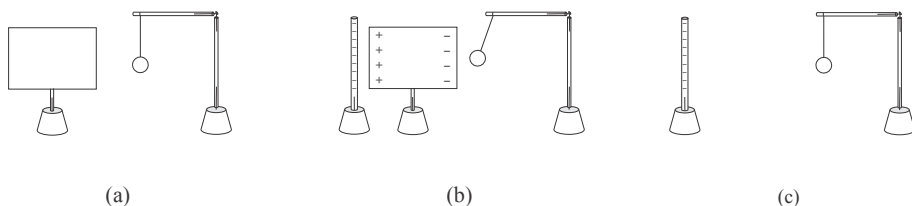


FIG. 7.12 : (a) Un pendule neutre est suspendu verticalement près d'un rectangle en carton conducteur neutre (bord gauche A et bord droit B). (b) Lorsqu'une paille frottée est approchée d'un bord du rectangle, le pendule est attiré par l'autre bord. (c) Lorsque nous retirons le rectangle, le pendule revient à la verticale.

Nous chargeons négativement une paille en plastique en la frottant sur toute sa longueur dans des cheveux, puis nous la fixons verticalement sur un support. Nous la plaçons ensuite dans le plan du rectangle, à l'opposé du pendule et loin de celui-ci. Nous approchons ensuite lentement la paille du bord gauche A du rectangle. Lorsque la paille est suffisamment proche, le pendule s'incline vers le rectangle, figure 7.12 (b). Nous ne devons pas approcher la paille trop près du rectangle, afin d'éviter tout contact entre le disque et le rectangle. Lorsque nous retirons la paille, nous observons que le pendule revient à son orientation verticale.

Nous supposons que la paille frottée est à nouveau proche du rectangle, de telle sorte que le pendule s'incline vers le rectangle, comme dans la figure 7.12 (b). Nous retirons maintenant le rectangle, sans toucher ni la paille ni le pendule. Le rectangle doit être retiré dans une direction perpendiculaire à son plan. Une fois le rectangle retiré, nous observons que le pendule revient à son orientation verticale, figure 7.12 (c).

Cette expérience montre que le pendule est attiré par le rectangle polarisé et non par la paille frottée, qui est trop éloignée du pendule. La paille électrisée est responsable de la polarisation du rectangle conducteur, mais il est trop éloigné pour avoir un effet notable sur le pendule.

Expérience 7.10

Dans cette expérience, nous utilisons le rectangle de carton fin de l'expérience 7.6, un pendule électrique et une paille en plastique. Nous chargeons la paille négative-

ment en la frottant sur toute sa longueur dans des cheveux, puis nous la plaçons verticalement sur le support. Lorsque nous approchons un pendule neutre de la paille frottée, nous observons une attraction lorsqu'ils sont très proches l'un de l'autre. Cela se traduit par une inclinaison du disque du pendule vers la paille frottée. En revanche, lorsque la distance entre la paille frottée et le disque en papier du pendule est supérieure ou égale à environ 15 cm, le pendule reste vertical. Même si la paille frottée peut l'attirer, cette force est si faible qu'elle est à peine perceptible, figure 7.13 (a).

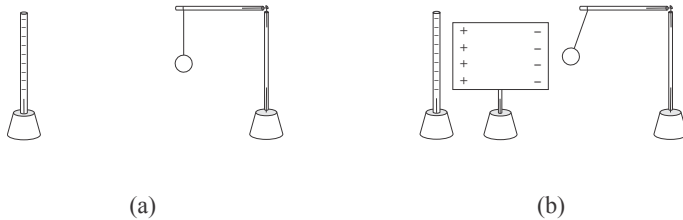


FIG. 7.13 : (a) Une paille négative à une distance de 15 cm d'un pendule neutre. (b) Lorsque nous plaçons un rectangle en carton conducteur entre eux, nous observons que le pendule est attiré par le rectangle.

Nous supposons maintenant que la paille frottée verticalement et le fil vertical du pendule électrique neutre sont séparés de 15 cm, le rectangle étant éloigné d'eux, comme dans la figure 7.13 (a). Nous plaçons ensuite le plan du rectangle, de dimensions 10 cm par 7 cm, parallèlement au plan reliant la paille et le fil du pendule, ces deux plans étant séparés l'un de l'autre. Après cela, nous déplaçons le rectangle dans une direction perpendiculaire à son plan, de manière à ce qu'il reste entre la paille frottée et le pendule, tous trois dans le même plan, figure 7.13 (b). Nous observons que le pendule est attiré par le rectangle, s'inclinant vers lui. Pour l'instant, nous éviterons de les mettre en contact.

Les expériences 7.9 et 7.10 montrent un nouveau type d'attraction. Jusqu'à présent, nous avons vu un corps chargé (conducteur ou isolant) attirer des corps neutres. Dans les cas présents, en revanche, la paille frottée est éloignée du pendule et ne l'attire pas suffisamment pour le faire pencher vers lui. Mais dans la section 7.3, nous avons vu qu'une plaque conductrice se polarise à proximité de la paille frottée. Cette séparation des charges sur le corps du rectangle est illustrée dans la figure 7.13 (b). Le rectangle n'a pas de charge nette. La somme de ses charges positives (proches de la paille frottée) et de ses charges négatives (à l'extrémité la plus éloignée) est nulle. Malgré cela, il attire un pendule neutre placé près de son côté négatif. Cela est indiqué par l'inclinaison du pendule dans la figure 7.13 (b). Comme les charges négatives du rectangle sont plus proches du disque du pendule que les charges positives du rectangle, le pendule est attiré par le rectangle. Autrement dit, l'influence des charges négatives proches sur le disque est plus importante que l'influence opposée des charges positives éloignées.

Comme on le verra dans l'annexe B, ce nouveau type d'attraction a été reconnu et découvert comme un phénomène électrique typique par Stephen Gray en 1729. Bien qu'il ait découvert ce nouveau type d'attraction, il ne connaissait pas la polarisation du conducteur et n'avait pas notre interprétation moderne de ses propres expériences.

L'interprétation actuelle est essentiellement due à Aepinus. Il faut garder à l'esprit que, bien que le rectangle conducteur n'ait pas de charge nette, il peut attirer un autre corps neutre II qui se trouve près d'un de ses côtés, à condition que le rectangle soit polarisé par un corps chargé I placé à proximité de l'autre côté du rectangle.

Expérience 7.11

Dans cette expérience, nous utilisons à nouveau le rectangle de carton fin de l'expérience 7.6, un pendule électrique et une paille en plastique.

Nous frottons la paille dans des cheveux et chargeons le disque en papier du pendule électrique à l'aide du mécanisme *ACR*, comme décrit dans la section 4.8. Lorsque nous approchons la paille frottée du pendule chargé, nous observons une répulsion, comme l'indique l'inclinaison du pendule par rapport à la verticale. En revanche, lorsque la distance entre la paille frottée et le disque en papier du pendule est supérieure ou égale à 15 cm, le pendule reste vertical. Bien que les deux soient chargés négativement, la force de répulsion à cette distance est trop faible pour être facilement détectée, figure 7.14 (a).

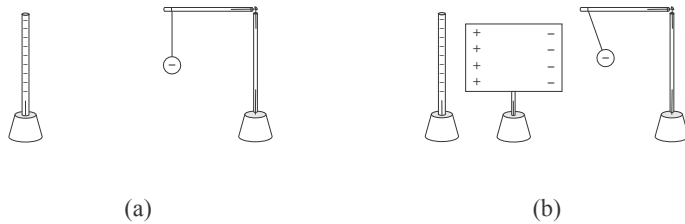


FIG. 7.14 : (a) Une paille chargée négativement n'a pas d'effet notable sur un pendule chargé négativement qui se trouve loin d'elle. (b) Lorsqu'un rectangle conducteur initialement neutre est placé entre eux, une répulsion apparaît.

Nous déplaçons maintenant la paille frottée verticalement près d'un bord du rectangle de carton fin, en évitant qu'elles n'entrent en contact. Dans le même plan vertical, nous plaçons la paille frottée verticalement, le rectangle et le pendule chargé. La paille chargée reste près d'un bord vertical du rectangle et le pendule est initialement éloigné de l'autre bord. Nous rapprochons maintenant lentement le pendule du rectangle. Nous observons que le pendule est repoussé par le rectangle. Cette répulsion augmente lorsque nous réduisons la distance entre eux. Lorsqu'il y a une distance de 15 cm entre la paille frottée et la projection verticale du point d'appui du fil de soie du pendule, ce fil s'éloigne visiblement de la verticale, car il est repoussé par le rectangle entre la paille et le pendule, figure 7.14 (b).

Nous retirons maintenant le rectangle, en maintenant la paille frottée et le pendule immobiles par rapport au sol. Le rectangle doit être retiré dans une direction horizontale perpendiculaire à son plan. Une fois le rectangle retiré, nous observons que le pendule chargé revient à la verticale, à 15 cm de la paille frottée.

Cette expérience est une autre preuve de la polarisation du rectangle conducteur en présence de la paille frottée.

Expérience 7.12

Il est possible de réaliser une expérience analogue à l'expérience 7.11 en utilisant une rectangle de carton fin comme celle de l'expérience 7.6, une paille en plastique frottée et un pendule électrique déchargé. La paille frottée est placée verticalement près d'un bord du rectangle (le bord gauche, par exemple), le pendule déchargé étant éloigné du rectangle, mais dans le même plan vertical, figure 7.15 (a).

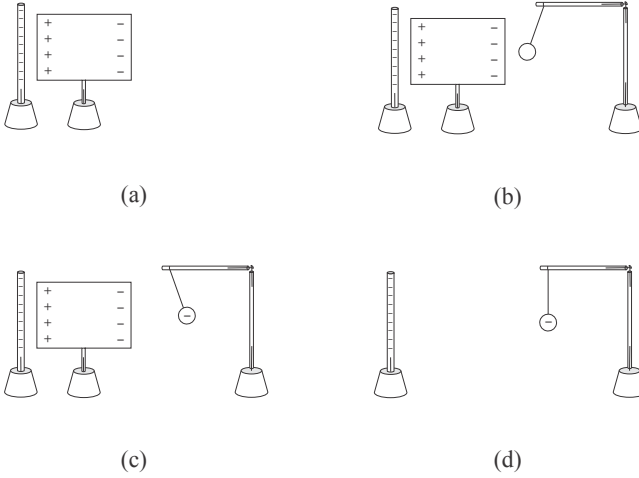


FIG. 7.15 : (a) Rectangle conducteur placé à proximité d'une paille chargée. (b) Un pendule neutre situé à proximité est attiré par le rectangle. (c) Après contact, le pendule est repoussé par le rectangle. (d) Lorsque le rectangle est retiré, le pendule négatif reste suspendu verticalement, car il est éloigné de la paille négative.

Nous amenons maintenant lentement le pendule vers le bord droit du rectangle. À une certaine distance du rectangle, nous observons que le disque en papier du pendule est attiré par le rectangle, comme dans la figure 7.15 (b).

Lorsque la paille chargée est rapprochée encore plus près du bord gauche du rectangle, le disque touche le rectangle et commence à être repoussé par celle-ci en raison du mécanisme ACR. Nous arrivons alors à une situation analogue à celle de la figure 7.14, comme dans la figure 7.15 (c).

Lorsque nous retirons le rectangle, le pendule revient à la verticale, comme dans la figure 7.15 (d). Lorsque la paille frottée est rapprochée du pendule, une répulsion apparaît. Cela indique que les deux corps (la paille et le pendule) sont électrisés avec des charges de même signe.

Expérience 7.13

Une expérience analogue à l'expérience 7.12 consiste à approcher un pendule électrique initialement déchargé d'un bord d'un rectangle conducteur déchargé, sans le toucher. Le pendule reste vertical. Nous approchons maintenant lentement une paille

verticale frottée de l'autre bord du rectangle. À une certaine distance, le pendule commence à être attiré par le rectangle, le touche, puis en est repoussé. Nous retirons maintenant le rectangle. Lorsque la paille chargée est approchée du pendule, une répulsion apparaît. Cela indique que les deux ont des charges de même signe.

7.5 L'utilisation de la polarisation pour charger un électroscope

Jusqu'à présent, nous avons vu comment charger un corps positivement ou négativement par frottement. De plus, lorsque nous utilisons le mécanisme *ACR*, nous avons vu comment électriser un conducteur avec une charge du même signe que celle d'un corps préalablement frotté. Nous utilisons maintenant la polarisation électrique des conducteurs, ainsi que le fait que les charges se déplacent librement à leur surface, pour décrire un troisième mécanisme d'électrisation.

Définitions : Conformément aux définitions présentées dans la section 7.3, les mécanismes de charge décrits dans cette section sont appelés « électrisation par induction », « charge par induction », « électrisation par influence » ou « charge par influence ».

7.5.1 Premier procédé d'électrisation par induction

Expérience 7.14

Nous construisons deux électroscopes à partir de rectangles de carton fin de 10 cm sur 7 cm, *A* et *B*, comme dans la section 6.1. Les côtés les plus longs seront verticaux. Des bandes de papier de soie sont fixées au centre supérieur de ces électroscopes. Ces deux électroscopes sont placés côte à côte dans un même plan vertical, leurs côtés les plus proches se touchant, comme le montre la figure 7.16 (a). Nous les déchargeons par contact avec notre doigt. Les deux bandes restent verticales. Nous frottons une paille en plastique dans des cheveux afin qu'elle soit bien électrisée, comme l'indique le test du mur dans l'expérience 3.6. Cette paille frottée est fixée verticalement à un support approprié, et initialement éloignée des électroscopes.

Nous approchons lentement cette paille frottée du bord vertical libre de l'électroscope *A*, sans les mettre en contact. Elle doit rester proche de ce bord, avec l'électroscope *A* entre elle et l'électroscope *B*. Les deux bandes se soulèvent, indiquant que chaque électroscope s'est chargé, comme le montre la figure 7.16 (b).

En maintenant la paille frottée près du bord libre de l'électroscope *A*, nous éloignons l'électroscope *B* de l'électroscope *A*. Ce faisant, nous devons veiller à ne toucher que la paille en plastique ou sa base de support, qui maintient le carton de l'électroscope *B*, sans toucher ni son carton ni sa bande. Nous observons que les deux bandes restent relevées, comme le montre la figure 7.16 (c).

Après cette procédure, nous plaçons la paille frottée loin des deux électroscopes. Nous notons que les deux bandes restent relevées, comme le montre la figure 7.16 (d), ce qui indique que les électroscopes sont chargés.

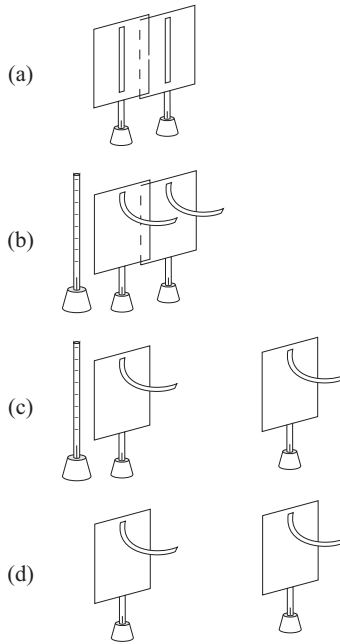


FIG. 7.16 : Première procédé de charge par induction.

Nous tenons maintenant la paille frottée à l'horizontale, à la même hauteur que les extrémités inférieures des bandes relevées des électroscopes. Lorsque nous approchons la paille frottée horizontale de la bande de l'électroscope *B*, en évitant qu'elles n'entrent en contact, nous observons une répulsion de la bande. Autrement dit, la bande s'éloigne de la paille frottée, vers le carton de l'électroscope *B*. Cela montre que cet électroscope s'est électrisé avec une charge du même signe que la paille frottée.

Lorsque la paille frottée est lentement approchée de la bande de l'électroscope *A*, sans entrer en contact, il en résulte une attraction. Autrement dit, cette bande se déplace vers la paille, s'éloignant du carton de son électroscope. Cela indique que cet électroscope s'est électrisé avec une charge de signe opposé à celui de la paille frottée.

Nous retirons maintenant la paille frottée. Nous plaçons les deux électroscopes dans des plans parallèles, face à face, avec les bandes pointant l'une vers l'autre. En rapprochant ces deux électroscopes l'un de l'autre, mais en empêchant le contact entre les deux bandes, nous pouvons observer leur attraction mutuelle. Cela montre à nouveau qu'ils sont chargés de manière opposée, figure 7.17.

Cette expérience apporte une preuve supplémentaire de la polarisation électrique des conducteurs. Dans ce cas, les deux électroscopes *A* et *B*, qui se touchaient initialement, se sont comportés comme un seul conducteur. Lorsque nous avons approché la paille frottée de l'électroscope *A*, celui-ci s'est chargé d'une charge de signe opposé à celui de la paille, tandis que l'électroscope *B* s'est chargé d'une charge de même signe que celui de la paille. Lorsque nous avons retiré l'électroscope *B*, il a conservé

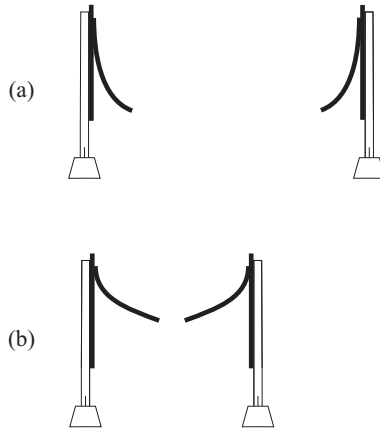


FIG. 7.17 : Deux électroscopes chargés par induction s'électrisent de manière opposée.

sa charge. Il en a été de même pour l'électroscope *A* lorsque la paille a été retirée.

Cette expérience montre également la conservation de la charge. La raison en est que les deux électroscopes étaient initialement déchargés. Pendant les expériences, ils étaient isolés du sol et nous ne les avons pas touchés avec la paille frottée. Après avoir été électrisés, l'un d'eux a reçu une charge positive et l'autre une charge négative. Cette expérience montre également que les charges électriques peuvent se déplacer librement à la surface des conducteurs. Elle montre également que nous pouvons séparer spatialement les charges positives et négatives, en accumulant chacune d'elles dans des électroscopes distincts.

7.5.2 Deuxième procédé d'électrisation par induction

Expérience 7.15

Nous décrivons maintenant un autre procédé pour électriser par induction.

La bande d'un électroscope initialement déchargé pointe verticalement vers le bas. Nous frotons soigneusement une paille en plastique dans des cheveux pour lui donner une bonne charge, comme dans l'expérience 3.6. Cette paille frottée est fixée verticalement à un support approprié, loin de l'électroscope.

Nous approchons lentement la paille frottée d'un bord de l'électroscope, en évitant qu'ils n'entrent en contact. Sa bande se soulève et reste relevée.

Tout en maintenant la paille frottée près d'un bord de l'électroscope, nous touchons l'autre bord avec notre doigt. La bande retombe et reste pointée vers le bas.

Tout en maintenant la paille frottée près d'un bord de l'électroscope, nous retirons notre doigt de l'autre bord. La bande reste pointée vers le bas.

Nous éloignons maintenant la paille frottée de l'électroscope. Une fois la paille retirée, la bande se soulève et reste relevée! Cela indique que ce procédé a chargé l'électroscope.

Ces cinq étapes sont illustrées dans la figure 7.18.

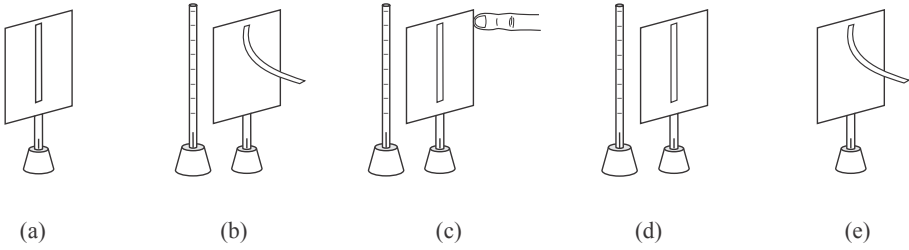


FIG. 7.18 : Deuxième procédé pour charger un électroscope par induction.

La paille frottée est maintenant placée horizontalement à la même hauteur que l'extrémité inférieure de la bande relevée. Nous approchons lentement la paille de cette bande, en évitant qu'elles n'entrent en contact. Nous observons qu'elles s'attirent mutuellement, la bande se déplaçant vers la paille et s'éloignant du carton de l'électroscope. En déplaçant la paille frottée vers le haut, nous pouvons même faire en sorte que l'extrémité libre de la bande s'élève au-dessus du bord supérieur de l'électroscope, figure 7.19.

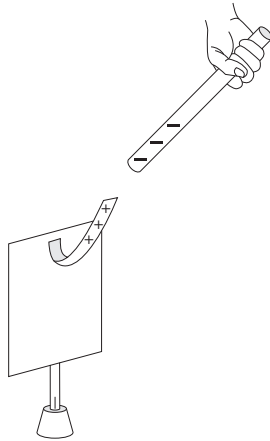


FIG. 7.19 : Paille chargée négativement attirant la bande de l'électroscope de la figure 7.18 après l'expérience.

Cela indique que l'électroscope s'est électrisé avec une charge de signe opposé à celui de la paille frottée.

Nous pouvons décrire ce qui s'est passé à l'aide des résultats précédents. Lorsque la paille frottée s'est approchée d'un bord de l'électroscope, celui-ci s'est polarisé électriquement. Le bord proche de la paille s'est chargé d'une charge de signe opposé à celui de la paille, tandis que le bord opposé s'est chargé d'une charge de même signe que celui de la paille. Lorsque nous avons touché le bord opposé libre de l'électroscope, nous avons déchargé l'électricité qui s'était accumulée de ce côté. Comme la paille frottée restait proche du premier bord, les charges à ce bord sont restées

opposées à la charge de la paille, en raison de leur attraction mutuelle. Autrement dit, elles n'ont pas été déchargées par notre doigt touchant l'autre bord. Lorsque nous avons retiré notre doigt du deuxième bord libre, rien n'a changé pour les charges du premier bord. Nous avons ensuite retiré la paille chargée. Après ce procédé, les charges qui étaient concentrées sur le premier bord se sont réparties sur l'ensemble de l'électroscope. Cela a soulevé la bande. Cette répartition des charges est illustrée dans la figure 7.20.

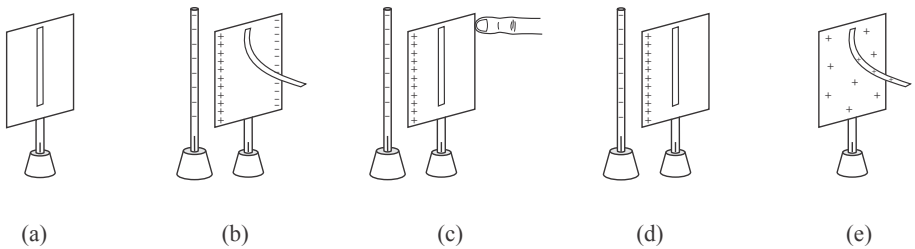


FIG. 7.20 : Répartition des charges de la figure 7.18.

Avec cette expérience, nous obtenons un effet opposé à celui des expériences 6.2 et 6.5 où, lorsque nous avons chargé un électroscope par friction ou par contact, celui-ci a acquis une charge du même signe que le corps qui l'avait chargé. Dans cette expérience, en revanche, l'électroscope a acquis une charge de signe opposé à celui du corps frotté qui avait été placé à proximité.

Dans ce cas, le carton de l'électroscope était initialement neutre. À la fin du processus, il était électrisé. Afin d'obtenir cette électrisation de l'électroscope, nous avons utilisé le procédé suivant. Nous avons d'abord polarisé l'électroscope en présence d'un corps chargé, puis mis à la terre l'extrémité libre de l'électroscope, supprimé le contact avec la terre et retiré le corps frotté à la fin du processus. La mise à la terre était nécessaire pour neutraliser la charge qui s'était accumulée à l'extrémité libre du conducteur en raison de sa polarisation. Le résultat final est que l'électroscope s'est électrisé. Dans ce cas, la mise à la terre a eu pour effet de le charger ! Cela montre que la mise à la terre ne décharge pas toujours un corps, comme c'était le cas dans l'expérience 4.9.

7.5.3 Troisième procédé d'électrisation par induction

Expérience 7.16

L'expérience 7.15 peut être réalisée d'une autre manière en utilisant à nouveau un électroscope. Dans un premier temps, nous relierons l'un des bords de l'électroscope à la terre en le touchant avec notre doigt ou en le connectant à la terre à l'aide d'un morceau de fil métallique. Une fois ce bord relié à la terre, nous approchons une paille frottée de l'autre bord de l'électroscope, sans le toucher. Lorsque la paille frottée est proche de ce deuxième bord, nous retirons la connexion à la terre du premier bord. Nous retirons ensuite la paille frottée et observons qu'à la fin du processus, cet électroscope s'est électrisé, comme l'indique sa bande relevée, figure 7.21. Lorsque nous

testons le signe de la charge acquise par l'électroscope, nous constatons qu'il est opposé à la charge de la paille.

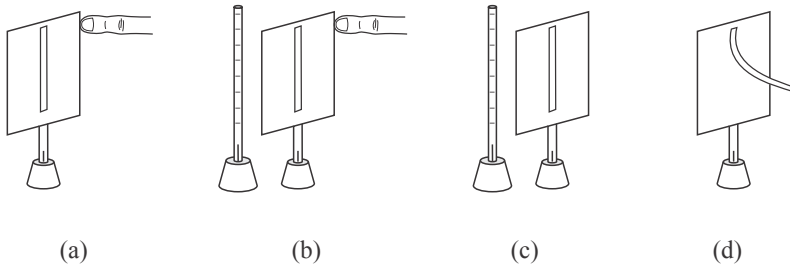


FIG. 7.21 : Troisième procédé pour charger un électroscope par induction.

La répartition des charges dans cette expérience est illustrée à la figure 7.22.

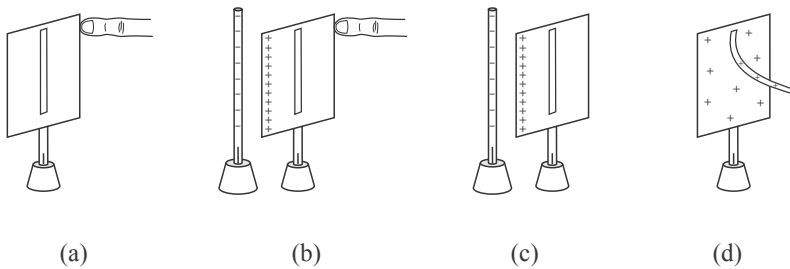


FIG. 7.22 : Répartition des charges de la figure 7.21.

7.6 La polarisation électrique des isolants

Nous allons maintenant examiner d'autres différences entre les conducteurs et les isolants.

Expérience 7.17

Nous répétons maintenant l'expérience 7.11 avec une plaque rectangulaire de polystyrène neutre de 10 cm sur 7 cm, au lieu du rectangle de carton fin. Le polystyrène est un isolant, tandis que le carton fin est un conducteur. Nous frottons une paille en plastique dans des cheveux et elle charge un pendule par le mécanisme ACR, qui devient alors également chargé négativement.

Lorsque la paille frottée se trouve à une distance supérieure ou égale à 15 cm du pendule chargé, le fil de soie reste vertical. Leur répulsion est trop faible pour être détectée. En revanche, lorsque cette distance est de 15 cm et que la plaque de polystyrène est placée entre la paille frottée et le pendule, nous observons que le pendule chargé est repoussé par la plaque.

frottée et le disque en papier d'un pendule électrique ordinaire. Cette force est indiquée par l'angle d'inclinaison du disque par rapport à la verticale lorsque la paille frottée se trouve à la même distance des deux pendules.

Si nous laissons la paille frottée et le disque en plastique du pendule en plastique entrer en contact, ils se collent l'un à l'autre. Autrement dit, le phénomène *ACR* décrit dans l'expérience 4.10 et dans la section 4.8 ne se produit pas avec un pendule en plastique. La séquence d'attraction, de contact et de répulsion ne se produit normalement que pour un conducteur. Lorsque le corps qui est attiré est un isolant neutre, il peut toucher le corps qui l'attire sans être repoussé par celui-ci par la suite. Le mécanisme *ACR* ne se produit pour un isolant qu'après plusieurs contacts avec le corps frotté, ou lorsque nous raclant le corps frotté sur l'isolant.

Il s'agit là d'une différence importante entre les conducteurs et les isolants. Pour charger un isolant comme le plastique, nous devons le frotter, comme dans l'expérience 2.1. Un conducteur, en revanche, peut être chargé non seulement par frottement, comme nous l'avons vu dans les expériences 6.2 et 6.24, mais aussi par le mécanisme *ACR*. Dans ce cas, le contact entre un conducteur et un corps préalablement chargé suffit généralement pour qu'une partie de la charge du corps électrisé soit transférée au conducteur.

Expérience 7.19

Nous répétons l'expérience 7.3 avec un disque neutre en plastique dur ou en polystyrène, au lieu d'un disque en carton fin. Cette fois-ci, lorsque nous retirons les plans de Coulomb afin de tester leurs charges, nous constatons qu'aucun d'entre eux ne s'est électrisé.

Cependant, nous avons vu dans l'expérience 7.17 que le polystyrène se polarise électriquement en présence d'une paille frottée. Cela montre que la polarisation qui se produit dans un isolant est différente de la polarisation d'un conducteur.

7.7 Un corps électrisé attire-t-il davantage un conducteur ou un isolant ?

Dans cette section, nous abordons une question intéressante. Tout d'abord, nous électrisons une paille en plastique en la frottant dans des cheveux. Nous plaçons un petit conducteur léger et un petit isolant léger séparés l'un de l'autre sur une table. Supposons que ce conducteur et cet isolant aient le même poids et la même taille. Lorsque nous approchons la paille frottée du conducteur et de l'isolant, lequel sera le plus attiré ? Autrement dit, lequel subira la force la plus importante exercée par la paille électrisée ?

Dans les expériences 2.3 et 2.4, nous avons vu qu'un plastique frotté attire plus fortement les substances conductrices (comme le papier et le métal) que les substances isolantes de même poids, taille et forme (comme le plastique ou la soie).

Expérience 7.20

Dans cette expérience, nous illustrons la propriété selon laquelle un conducteur subit une force plus importante exercée par un corps électrisé proche qu'un isolant. Nous n'aurons pas besoin de peser le conducteur ou l'isolant. Pour ce faire, nous utilisons deux pendules en plastique de même taille et de même forme, fabriqués à partir des mêmes matériaux, figure 7.23. Dans le pendule *II*, un disque en papier ou en feuille d'aluminium est fixé au disque en plastique. En raison du matériau supplémentaire qui y est fixé, il pèse plus lourd que le pendule *I*, auquel rien n'a été ajouté.

Avant de commencer l'expérience, nous approchons un doigt des deux pendules. S'ils ne sont pas attirés par le doigt, cela indique qu'ils n'ont pas été électrisés lors de leur fabrication. Ce n'est pas toujours facile à réaliser, car le pendule en plastique peut facilement acquérir une charge nette lors de sa fabrication (friction avec notre main lors de la découpe ou de l'attache du disque en plastique au fil de soie). Si cela se produit, il existe un procédé simple pour décharger le pendule. Il suffit d'attendre longtemps (plusieurs heures) que le disque en plastique perde cette charge au contact de l'air ambiant. Dans la section 7.14, nous abordons ce sujet plus en détail.

À partir de maintenant, nous supposons que les deux pendules sont neutres.

Nous approchons maintenant une paille frottée des deux pendules, en veillant toujours à ce que la paille et les disques des pendules n'entrent pas en contact. Le pendule en plastique est légèrement attiré par la paille frottée, figure 7.24 (a). Le pendule avec le disque en papier, en revanche, est beaucoup plus fortement attiré que le pendule en plastique, figure 7.24 (b). Cette force est indiquée par l'angle d'inclinaison de chaque pendule par rapport à la verticale (en supposant que la paille électrisée se trouve à la même distance du disque du pendule attiré). Bien que le pendule *II* soit plus lourd que le pendule *I*, il subit une force d'attraction plus importante que le premier pendule.

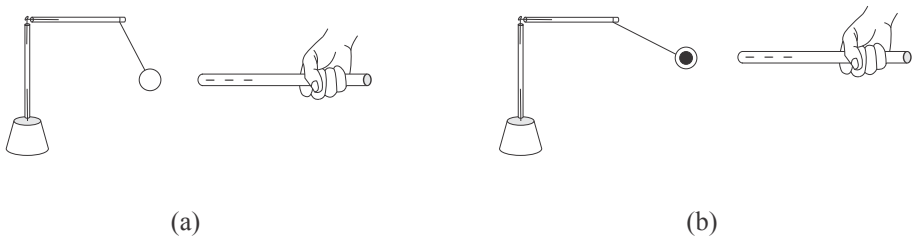


FIG. 7.24 : (a) Un pendule en plastique est faiblement attiré par une paille frottée. (b) En revanche, un pendule en plastique auquel un disque conducteur a été ajouté est fortement attiré par la paille frottée, malgré son poids plus important.

Expérience 7.21

Une expérience analogue peut être réalisée avec deux pendules sur lesquels nous remplaçons les disques en plastique par de petites boules en polystyrène. Tout comme le plastique, le polystyrène est également un matériau isolant. Nous plaçons des sphères de même taille sur les deux pendules. Après ce procédé, nous recouvrons

le pendule *II* de feuille d'aluminium. Nous approchons ensuite une paille frottée des deux pendules. Nous observons que le pendule recouvert de feuille d'aluminium est davantage attiré que le pendule *I*, auquel rien n'a été ajouté.

Expérience 7.22

Nous construisons maintenant deux « fils pendulaires isolants », comme dans la figure 7.25. Ils sont analogues au fil pendulaire de Gray, figure 4.28. Mais maintenant, nous remplaçons la brochette en bois par une paille en plastique, et le fil de coton par une bande de plastique souple. Les deux fils pendulaires isolants doivent avoir la même longueur et la même forme, et être fabriqués dans le même matériau. Nous enroulons maintenant la bande en plastique du pendule *II* avec un fil de coton léger, comme une hélice autour de celui-ci. Lorsque tout est prêt, nous testons les deux fils pendulaires afin de vérifier qu'ils sont neutres avant de commencer l'expérience.

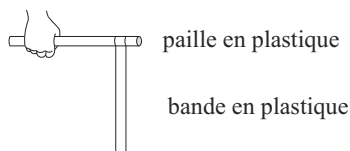


FIG. 7.25 : Un fil pendulaire isolant.

Nous approchons une paille frottée des deux fils pendants. Nous observons que le fil pendant *II*, muni du fil de coton conducteur, est davantage attiré que le fil pendant *I*, auquel rien n'a été ajouté, figure 7.26. Bien que le fil pendant *I* soit plus léger que le fil pendant *II*, il est moins fortement attiré que ce dernier.

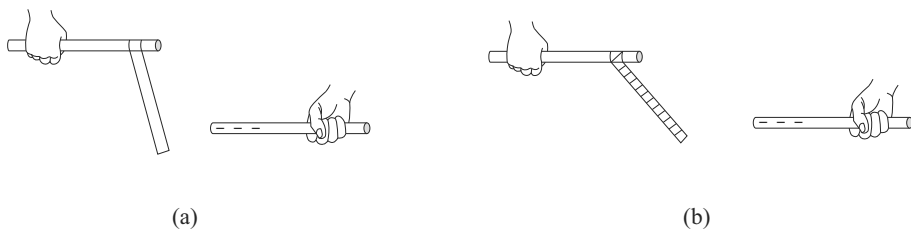


FIG. 7.26 : (a) Un fil pendulaire isolant est moins attiré par un corps électrisé qu'un autre fil pendulaire isolant auquel un fil conducteur a été ajouté (b).

Ces expériences montrent qu'un conducteur subit une force plus importante qu'un isolant, les deux forces étant exercées par le même corps électrisé. Du Fay et Aepinus font partie des chercheurs qui ont découvert ce fait de manière expérimentale.⁶

⁶[DF33d, pp. 233–234] et [Aep79, pp. 261, 274 et 309–315].

7.7.1 Discussion sur le pendule électrique de Gray

Comme mentionné dans la section 4.6, en 1720, Gray décrit un pendule électrique dans lequel il attachait une plume à un fil de soie relié à un bâton. À cette époque, personne ne connaissait la distinction entre les conducteurs et les isolants. Cela signifie que son utilisation d'un fil de soie était fortuite. La soie est un matériau isolant. À l'époque, Gray aurait tout aussi bien pu utiliser un fil de lin ou de coton, qui sont des conducteurs. Gray a chauffé un morceau de papier brun (transformant ce papier en isolant) et l'a chargé par friction. En approchant ce fin papier brun de la plume reliée au fil de soie, il a pu la soulever jusqu'à ce que le fil de soie devienne horizontal, c'est-à-dire perpendiculaire au bâton vertical. En soulevant encore plus haut le papier brun frotté, il pouvait faire s'étendre le fil de soie au-dessus du plan horizontal, restant droit dans l'air, comme dans la figure 4.21 (c). Dans la suite de cette expérience, il mentionna ce qui suit :^{7,8}

J'ai ensuite répété cette expérience sans la plume, à savoir avec un simple fil de soie d'environ 5 ou 6 pouces [13 ou 15 cm] de long, que j'ai placé à la verticale comme indiqué ci-dessus, sans toucher le papier [frotté et chauffé]; [...]

Une illustration de cette expérience figure à la figure 7.27.

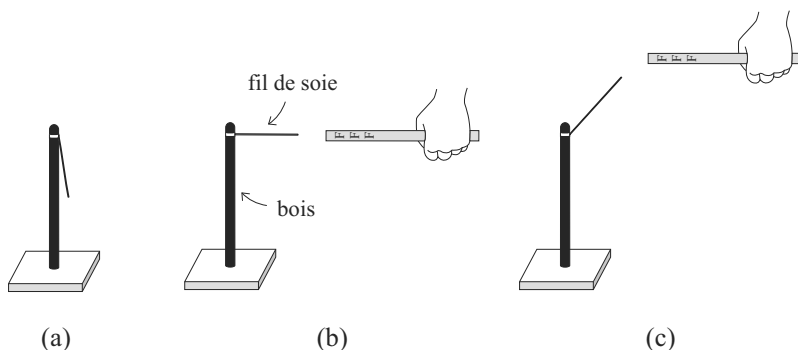


FIG. 7.27 : Gray attire un fil de soie en approchant un morceau de papier froissé.

Cela montre que la plume n'avait qu'un rôle secondaire dans cette expérience, puisqu'il pouvait soulever le fil de soie même sans la plume. Il existe deux explications possibles à cet effet curieux. La première est que lorsqu'il a attaché et détaché la plume au fil de soie, la soie a agi comme un isolant et s'est chargée à son extrémité inférieure par frottement avec ses mains. Le papier brun chauffé et frotté a peut-être été électrisé avec une charge de signe opposé à celle de la soie chargée. Lorsque Gray a rapproché ces deux substances, elles se sont attirées l'une l'autre. Gray a alors pu soulever le fil de soie au-dessus de l'horizontale. La deuxième possibilité est que lorsqu'il a attaché

⁷[Gra20, p. 107].

⁸I then repeated this Experiment without the Feather, viz. by a single thread of Silk only of about 5 or 6 inches long [13 or 15 cm], which was made to stand extended upright as above-mentioned, without touching the [rubbed and heated] Paper; [...]

et détaché la plume, le fil de soie est peut-être devenu humide, peut-être à cause de la sueur des mains de Gray. Si tel était le cas, le fil de soie se serait alors comporté comme un conducteur. Lorsqu'il a approché le papier brun chauffé et frotté du fil, le fil conducteur se serait polarisé. Autrement dit, son extrémité la plus basse, qui était plus proche du papier chargé, aurait acquis une charge de signe opposé. En raison de la forte attraction entre les charges du papier et celles situées à l'extrémité libre du fil, Gray aurait pu soulever le fil au-dessus de l'horizontale. Cela serait analogue à notre expérience 6.6.

Si le fil de soie était sec et déchargé, il se comporterait comme un isolant neutre ordinaire. Dans ce cas, Gray n'aurait pas pu le soulever au-dessus de l'horizontale, même en approchant le papier brun chargé du fil. Normalement, l'attraction entre un corps chargé et un isolant neutre est beaucoup plus faible que l'attraction entre un corps chargé et un conducteur neutre. Elle est également beaucoup plus faible que l'attraction entre deux corps de charges opposées.

7.8 Forces d'origine non électrostatique

Comme nous l'avons vu au chapitre 5, deux corps chargés positivement se repoussent, deux corps chargés négativement se repoussent, tandis qu'un corps positif et un corps négatif s'attirent. On exprime parfois cela en disant que les charges de même signe se repoussent, tandis que les charges opposées s'attirent. Les forces électriques que ces corps exercent l'un sur l'autre lorsqu'ils sont au repos sont appelées forces électrostatiques.

Dans toutes les situations où deux ou plusieurs charges sont au repos l'une par rapport à l'autre dans une configuration d'équilibre stable, des forces non électrostatiques sont nécessaires pour équilibrer les forces électrostatiques exercées entre les charges en interaction.⁹ Nous illustrons cela ici dans le cas d'une sphère conductrice chargée négativement. La sphère peut avoir été électrisée, par exemple, par une paille en plastique frottée avec des cheveux. Les charges sur le conducteur se repoussent mutuellement. Après avoir atteint l'équilibre, elles sont réparties uniformément sur la surface de la sphère, figure 7.28.

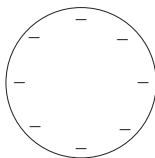


FIG. 7.28 : Une sphère chargée uniformément.

Considérons la charge négative au sommet de la sphère. Elle est repoussée par toutes les autres charges négatives. Elle subit donc une force électrostatique verticale dirigée vers l'extérieur du centre de la sphère. Une force d'origine non électrostatique dirigée vers le bas, d'intensité égale à celle de la force électrostatique dirigée vers le

⁹Voir [AH07, Section 5.3], [AH09, Section 5.3], et les références qui y sont mentionnées.

haut, est nécessaire pour maintenir cette charge négative au repos. 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.

La même situation se produit lorsque la sphère conductrice est chargée positivement. Et le même raisonnement est valable pour une sphère isolante qui est uniformément électrisée, que ce soit négativement ou positivement.

7.9 Modèles microscopiques des conducteurs et des isolants

Afin de comprendre l'ensemble de ces expériences montrant les différences et les similitudes entre les conducteurs et les isolants, des modèles microscopiques de ces corps sont créés. Ces modèles nous aident à comprendre et à visualiser les processus décrits ici. Ils ont été créés à partir de résultats d'expériences analogues à celles décrites dans cet ouvrage. Ensuite, le procédé est inversé. Autrement dit, ces modèles sont postulés, puis utilisés afin d'illustrer ou de décrire ce qui se passe dans les expériences.

Ce comportement variant conduit à deux modèles microscopiques différents pour les conducteurs polarisés et les isolants polarisés. Pour les conducteurs, nous supposons l'existence de charges libres. Nous supposons que dans les conducteurs, il existe des charges qui ne sont pas liées aux molécules du matériau et qui sont donc libres de se déplacer dans tout le conducteur. Lorsque le conducteur est neutre, ces charges libres ne subissent aucun mouvement macroscopique net et ne génèrent aucun effet externe. En revanche, lorsque nous déplaçons un corps chargé à proximité de ce conducteur, celui-ci se polarise. En particulier, la partie du conducteur la plus proche du corps chargé s'électrise avec une charge nette de signe opposé, tandis que la partie opposée du conducteur s'électrise avec des charges de même signe que celles du corps chargé, figure 7.29. Ces charges libres polarisées peuvent être transférées à d'autres conducteurs si ces derniers entrent en contact avec ce conducteur polarisé.

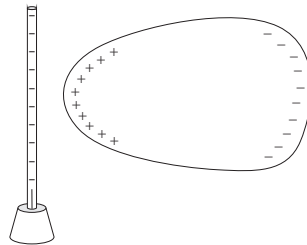


FIG. 7.29 : Modèle microscopique d'un conducteur polarisé idéalisé proche d'un autre corps chargé.

Nous supposons l'existence d'une force d'origine non électrostatique afin d'empêcher ces charges libres de quitter la surface du conducteur, sauf dans des conditions

de claquage où il y a des décharges électriques dans l'air.

La mise à la terre d'un conducteur en présence d'un corps chargé à proximité, comme le montrent les expériences 7.15 et 7.16, est illustrée à la figure 7.30.

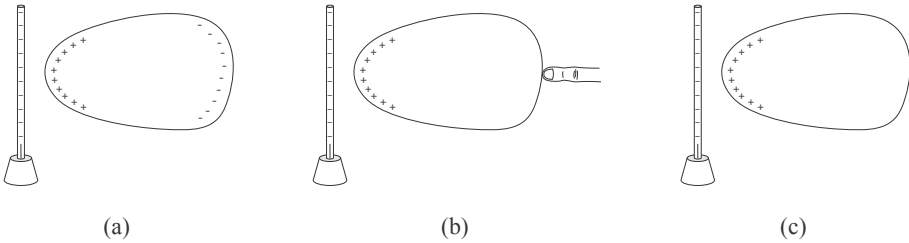


FIG. 7.30 : Mise à la terre d'un conducteur en présence d'un corps chargé à proximité.

Nous présentons maintenant le modèle microscopique d'un isolant. Dans ce cas, nous supposons que lorsque nous déplaçons un corps chargé près d'un isolant, seules les molécules de l'isolant se polarisent. Autrement dit, les parties des molécules de l'isolant qui sont plus proches du corps chargé s'électrifient avec des charges de signe opposé à celui du corps chargé. Les parties des molécules de l'isolant qui sont les plus éloignées du corps chargé, en revanche, se chargent électriquement avec des charges de même signe que ce corps. Pour les isolants, il n'y aurait pas de mouvement net des charges libres, seulement une polarisation de ses molécules, figure 7.31 (a).

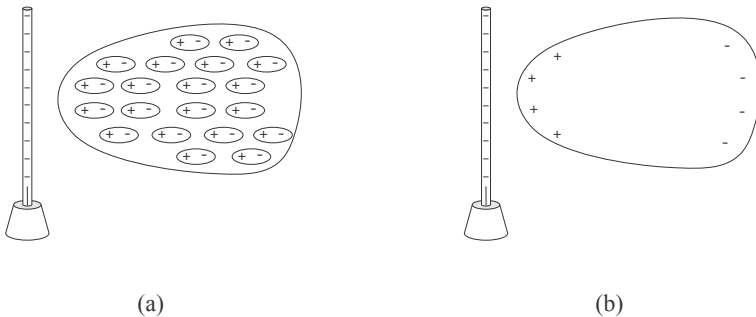


FIG. 7.31 : (a) Modèle microscopique d'un isolant idéalisé polarisé en présence d'un autre corps chargé. (b) Polarisation effective de l'isolant dans la situation (a).

À l'intérieur de l'isolant, il y aurait des quantités égales de charges positives et négatives, très proches les unes des autres. Si l'on considère un petit volume à l'intérieur de l'isolant contenant de nombreuses molécules, la somme nette de ces charges serait approximativement nulle. Cela signifie que l'on peut considérer l'intérieur de l'isolant polarisé comme macroscopiquement neutre. Mais ce ne sera pas le cas pour la surface. L'effet net de ces polarisations moléculaires serait que la surface de l'isolant la plus proche du corps chargé se comporterait comme si elle était électrisée avec des charges de signe opposé à celles du corps chargé externe. La surface de l'isolant la plus éloignée du corps chargé, en revanche, se comporterait comme si elle était électrisée

avec des charges de même signe que celles de ce corps. Cette polarisation effective est illustrée dans la figure 7.31 (b).

Une fois de plus, une force d'origine non électrostatique est nécessaire pour empêcher les charges polarisées dans chaque molécule de se déplacer à travers l'isolant.

La polarisation présentée dans la figure 7.29 est plus grande ou plus intense que la polarisation présentée dans la figure 7.31 (b). Ces figures ont été réalisées délibérément. Nous supposons que les conducteurs et les isolants ont la même forme et la même taille, et qu'ils se trouvent tous deux à la même distance d'une paille chargée avec la même intensité dans les deux cas. La raison des quantités de charge dans ces figures a été donnée dans la section 7.7. Les expériences montrent que la force exercée par un corps chargé sur un conducteur est supérieure à la force exercée par ce corps chargé sur un isolant. Cela indique que la polarisation d'un conducteur est supérieure à la polarisation effective d'un isolant. L'intensité ou le degré de cette polarisation est représenté par le nombre de charges opposées réparties sur les deux côtés du corps polarisé. Pour un conducteur, il y a plus de charges polarisées que pour un isolant, comme le montrent les figures 7.29 et 7.31 (b).

De plus, nous augmentons le nombre de charges polarisées dans les conducteurs et les isolants en diminuant leur distance par rapport au corps chargé voisin qui induit ces charges. Nous augmentons également le nombre de charges polarisées en augmentant l'électrisation du corps voisin qui polarise le conducteur et l'isolant.

En réalité, aucun corps n'est un conducteur parfait ou un isolant parfait. Par conséquent, ces modèles microscopiques sont des idéalizations. Les corps réels présentent les caractéristiques des deux comportements, à des degrés divers. Il existe une gradation entre les bons conducteurs et les bons isolants.

Quoi qu'il en soit, ces modèles idéalisés sont extrêmement utiles pour nous aider à comprendre et à visualiser ce qui se passe dans de nombreux phénomènes électriques.

7.10 Deux corps chargés électriquement de signes opposés peuvent-ils s'attirer ?

Expérience 7.23

Nous répétons l'expérience 6.5, figure 6.7. Mais cette fois, la paille négative est rapprochée encore plus près de la bande de l'électroscope chargé négativement. Nous observons que pour des distances inférieures ou égales à une certaine valeur, de l'ordre de 2 à 4 cm, la bande n'est plus repoussée par la paille, mais attirée par celle-ci. La bande touche la paille et reste attachée à celle-ci.

Expérience 7.24

Nous répétons les expériences 4.7 et 5.23, figures 4.18 et 5.27. Mais cette fois, la paille négative est rapprochée encore davantage du disque négatif du pendule. Nous observons que l'inclinaison du pendule par rapport à la verticale augmente lorsque la distance entre la paille et le pendule passe de 15 à 5 cm environ. Cela montre que

l'intensité de la force répulsive augmente lorsque la distance entre eux diminue dans cette plage.

Cependant, pour des distances inférieures ou égales à une certaine valeur, de l'ordre de 5 cm, il n'y a plus de répulsion entre la paille négative et le disque négatif. À ces petites distances, ils s'attirent mutuellement. Le disque touche la paille négative une deuxième fois et est à nouveau repoussé par celle-ci.

Après 2 ou 3 de ces contacts entre la paille négative et le disque du pendule, les mêmes phénomènes sont à nouveau observés, mais à des distances quelque peu différentes. Lorsque le disque a un degré d'électrisation plus élevé, la répulsion entre le disque et la paille négative peut être observée à une distance plus grande qu'auparavant, de l'ordre de 20 cm environ. L'intensité de la force répulsive augmente lorsque cette distance diminue entre 20 cm et une limite inférieure de 2 ou 3 cm. Lorsque la distance entre la paille et le disque est inférieure ou égale à cette limite inférieure, il y a à nouveau une attraction entre eux, et le mécanisme ACR entre en jeu.

Ces expériences peuvent être comprises à partir de principes découverts jusqu'à présent.

Supposons qu'un corps I , isolant, ait été chargé négativement par frottement. Il est proche d'un corps neutre II , conducteur, qui n'a pas de charge nette. Il y aura une force d'attraction entre eux. Cette force d'attraction est due à la polarisation du corps II en présence du corps I , comme dans la figure 7.29. Nous représentons leur force d'attraction par $F_A > 0$, figure 7.32 (a). Nous électrisons maintenant le corps II avec une charge de même signe que la charge du corps attractif I . Cela peut être fait, par exemple, par le mécanisme ACR. Cela générera une nouvelle force entre eux, répulsive et représentée ici par $F_R < 0$. Dans la figure 7.32 (b), nous présentons cette nouvelle force de répulsion, sans tenir compte de la force d'attraction précédente due à la polarisation du conducteur. La nouvelle charge négative sur le conducteur est représentée au milieu du corps II uniquement pour la distinguer des charges polarisées. Cette nouvelle charge sur le corps II aura tendance à polariser le corps I , générant une force d'attraction entre eux, mais nous ne tiendrons pas compte de cette petite composante ici. Dans tous les cas, l'attraction précédente qui existait entre eux restera inchangée. La force nette sera donnée approximativement par $F_N = F_A + F_R$. Si $F_A > |F_R|$, la force nette sera attractive. Si $F_A < |F_R|$, la force nette sera répulsive. Dans la figure 7.32 (c), nous montrons un exemple pour lequel $F_A < |F_R|$.

D'après ce que nous avons vu jusqu'à présent, nous pouvons donner trois conditions pour lesquelles nous pouvons avoir une force d'attraction nette entre ces deux corps électrisés avec des charges de même signe.

- La force d'attraction initiale est indépendante de la valeur de la nouvelle charge donnée au corps initialement neutre II , tandis que la nouvelle force de répulsion dépend de la valeur de cette nouvelle charge. Si cette nouvelle charge est très importante, $|F_R|$ sera généralement supérieure à F_A , figure 7.33 (a). En diminuant l'intensité de cette nouvelle charge sur le corps II , nous pouvons diminuer l'intensité de la nouvelle force de répulsion de telle sorte qu'une attraction nette subsiste entre les deux corps ayant une charge nette de même signe, figure 7.33 (b).

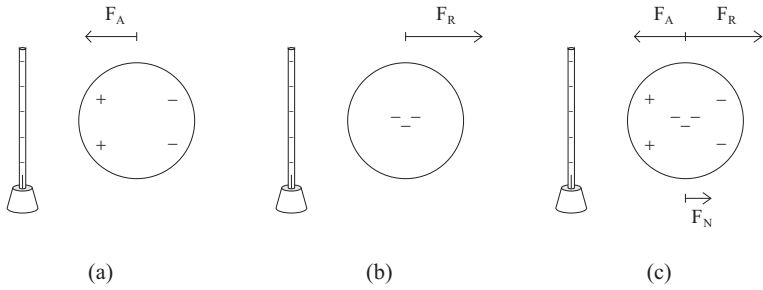


FIG. 7.32 : (a) Force d'attraction due à la polarisation d'un conducteur neutre à proximité d'un isolant électrisé. (b) Force de répulsion idéale entre un isolant négatif et un conducteur négatif, en supposant que le conducteur n'ait pas été polarisé par la paille négative. (c) Force nette $F_N = F_A + F_R$ entre un isolant électrisé et un conducteur, en supposant que le conducteur est électrisé et polarisé. Situation pour laquelle $F_A < |F_R|$.

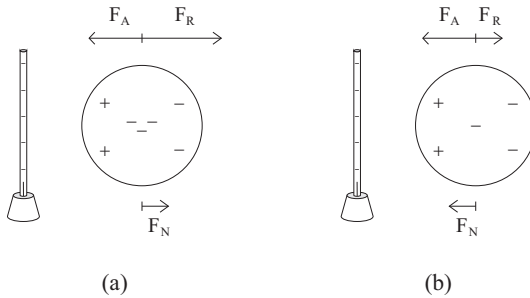


FIG. 7.33 : (a) Lorsque la charge nette du conducteur est importante, une force répulsive nette subsiste entre celui-ci et l'isolant négatif. (b) Lorsque le conducteur n'a qu'une faible charge nette, la force d'attraction due à sa polarisation est supérieure à la force répulsive due à sa charge nette, ce qui donne une force d'attraction nette.

- Supposons que le conducteur et l'isolant soient tous deux négatifs et que $|F_R| > F_A$, de telle sorte qu'il y ait une répulsion nette entre eux, figure 7.34(a). Lorsque nous augmentons la quantité de charge dans l'isolant, nous augmentons l'intensité de la force répulsive $|F_R|$. L'intensité de la force d'attraction F_A augmente, mais elle augmente plus rapidement que l'augmentation de $|F_R|$. La raison en est que nous augmentons également le nombre de charges polarisées sur le conducteur, comme le montre la section 7.3, figure 7.10. À titre d'exemple, si la charge de l'isolant augmente trois fois, $|F_R|$ augmente également environ trois fois. Mais d'un autre côté, F_A augmente environ neuf fois. Lorsque la quantité de charge sur l'isolant est augmentée, il y aura un point où F_A sera plus grande que $|F_R|$, ce qui produira une force d'attraction nette entre eux, figure 7.34 (b).

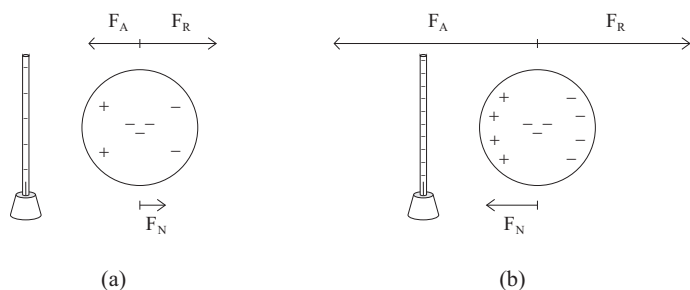


FIG. 7.34 : (a) La force répulsive est supérieure à la force attractive. (b) F_A augmente davantage que $|F_R|$ en raison d'une augmentation de la quantité de charge dans l'isolant voisin. Nous présentons ici une situation dans laquelle la force attractive est devenue supérieure à la force répulsive.

- Il existe également une autre situation qui peut produire une force d'attraction nette entre deux corps ayant des charges de même signe. Supposons que le conducteur et l'isolant soient tous deux négatifs et que $|F_R| > F_A$, de telle sorte qu'il existe une répulsion nette entre eux lorsqu'ils sont séparés par une distance d , figure 7.35 (a). Les intensités de ces deux forces d'attraction et de répulsion se comportent différemment en fonction de la distance entre les deux corps. En réduisant leur distance, nous augmentons l'amplitude de F_R uniquement en raison du rapprochement entre la charge négative de I et la charge négative nette de II . La force d'attraction F_A , en revanche, augmente pour deux raisons différentes. (a) La première est due à la réduction de la distance entre la charge négative de I et les charges polarisées de II . (b) La deuxième raison est que le nombre de charges polarisées sur II augmente également lorsque la distance entre I et II diminue, comme le montre la section 7.3, figure 7.8. Comme la force dépend non seulement de la distance, mais aussi du nombre de charges dans les corps, cette polarisation plus intense produira, en conséquence, une force d'attraction plus importante. Cela signifie que si les corps I et II sont très proches l'un de l'autre, il peut subsister une attraction nette entre eux même lorsque les deux ont une charge nette de même signe, figure 7.35 (b).

Le signe de la force nette (c'est-à-dire si elle est attractive ou répulsive) dépendra des valeurs des deux charges, de la distance entre les corps, de leurs formes, de leurs tailles et de leurs propriétés intrinsèques (c'est-à-dire s'ils sont conducteurs ou isolants, car cela affectera leur degré de polarisation).

Du Fay lui-même savait que, dans certaines circonstances, deux corps électrisés avec des charges de même signe pouvaient s'attirer :^{10,11}

¹⁰[DF34a, p. 265].

¹¹In order to succeed in these Experiments [of attraction between oppositely charge bodies, and repulsion between electrified bodies having charges of the same type], 'tis requisite that the two Bodies, which are put near one another, to find out the Nature of their Electricity, be rendered as electrical as possible; for if one of them was not at all, or but weakly electrical, it would be attracted by the other, though it be of that Sort, that [if well rubbed] should naturally be repelled by it. But the Experiment will always succeed

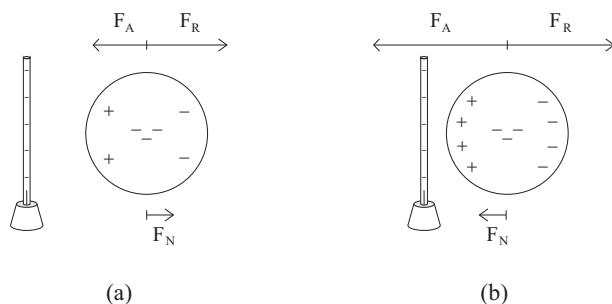


FIG. 7.35 : (a) La force répulsive $|F_R|$ est supérieure à la force attractive F_A . (b) Lorsque la distance entre les deux corps diminue, F_A augmente davantage que $|F_R|$. Nous présentons ici une courte distance pour laquelle la force attractive devient supérieure à la force répulsive.

Pour réussir ces expériences [d'attraction entre des corps de charges opposées et de répulsion entre des corps électrisés de charges identiques], il est nécessaire que les deux corps, qui sont placés l'un près de l'autre afin de déterminer la nature de leur électricité, soient rendus aussi électriques que possible ; car si l'un d'eux n'était pas du tout ou seulement faiblement électrique, il serait attiré par l'autre, même s'il est de ce type qui [s'il est bien frotté] devrait naturellement être repoussé par celui-ci. Mais l'expérience réussira toujours parfaitement si les deux corps sont suffisamment électriques.

Aepinus a donné une première ébauche d'explication mathématique des attractions possibles entre deux corps portant des charges de même signe. Il a démontré théoriquement et expérimentalement que si deux corps électrisés avec des charges de même signe sont suffisamment rapprochés, ou si l'une des deux charges impliquées est beaucoup plus faible que l'autre, les effets de la polarisation mutuelle peuvent être suffisants pour transformer la force répulsive normale en une attraction.¹²

Nous n'entrerons pas dans les détails ici, mais une analyse mathématique moderne indiquant les conditions dans lesquelles des corps électrisés, ayant des charges de même signe, peuvent s'attirer, peut être trouvée, par exemple, dans les travaux de Maxwell, dans un article de Melehy et dans le livre de Jackson.¹³

7.11 La conductivité de l'eau

Dans la section 6.3, nous avons vu que l'eau douce décharge un électroscope électrisé. Cela signifie qu'elle se comporte comme un conducteur pour les expériences électrostatiques habituelles décrites dans cet ouvrage. D'autre part, lorsqu'elle est soumise à une différence de potentiel de quelques volts à quelques centaines de volts, elle

perfectly well, if both Bodies are sufficiently electrical.

¹²[Aep79, pp. 126 et 315–325], [BW], et [Hei99, pp. 396–398].

¹³[Max81, Chapter VII : Theory of electrical images, pp. 80–88], [Mel98], et [Jac99, Section 2.3].

se comporte comme un isolant, comme on le voit dans la section 6.6. Dans les expériences de la section 2.5, nous avons traité d'une différence de potentiel de quelques milliers de volts, lorsque l'eau se comporte comme un conducteur. Il y a des raisons à ce comportement de l'eau. L'une d'elles est que, à l'état naturel, l'eau douce contient des ions positifs, H_3O^+ , et des ions négatifs, OH^- , en plus de molécules de H_2O . De plus, l'eau douce contient de nombreux sels, minéraux et impuretés qui regorgent de particules chargées électriquement, également appelées ions. En présence de différences de potentiel élevées, ces ions électrisés se déplacent dans l'eau, lui conférant son comportement conducteur.

Nous allons maintenant analyser les expériences de la section 2.5. Supposons que la goutte d'eau de l'expérience de Gilbert, l'expérience 2.10, se trouve sur une surface conductrice, telle que le bois, les métaux ou la plupart des solides. Lorsque nous approchons une paille en plastique frottée, la goutte change de forme. Elle se déforme en se dirigeant vers la partie frottée de la paille. Si la friction entre l'eau et la surface sur laquelle elle repose est faible, la goutte peut même se déplacer dans son ensemble vers la paille. Les résultats présentés dans ce chapitre permettent d'illustrer ce qui se passe dans cette expérience. C'est ce que montre la figure 7.36. Supposons que la paille ait été frottée avec des cheveux, acquérant ainsi une charge négative. Lorsqu'elle est approchée de la goutte, l'eau se polarise initialement dans son ensemble, de manière analogue à ce que nous avons vu dans la figure 7.29. Autrement dit, elle devient chargée positivement dans la région la plus proche de la paille frottée et chargée négativement dans la région la plus éloignée qui est en contact avec la surface sèche. Comme nous avons supposé une surface solide conductrice, il y a une neutralisation électrique sur la section de l'eau qui est en contact avec la surface. Cela est analogue à la mise à la terre dans les figures 7.20, 7.22 et 7.30. Par conséquent, l'eau finit par s'électriser dans son ensemble, c'est-à-dire avec une charge positive nette, opposée au signe des charges sur la paille. Comme les charges de signe opposé s'attirent, la goutte se déforme et pointe vers la paille frottée. Elle peut même se déplacer dans son ensemble vers celle-ci.

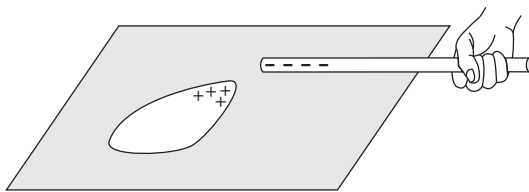


FIG. 7.36 : Charges électriques sur une goutte d'eau à proximité d'une paille en plastique frottée.

En d'autres termes, nous pensons que ce comportement de la goutte d'eau n'est pas dû à une simple orientation ou organisation des molécules polarisées de l'eau (bien qu'une molécule H_2O n'ait pas de charge nette, elle est naturellement polarisée, comme un dipôle électrique permanent). S'il n'y avait que l'organisation ou l'alignement des molécules polaires dans l'eau, en raison de la présence de la paille frottée à proximité, nous aurions quelque chose d'analogue à la figure 7.31 (a). Au lieu de cela,

il semble plus raisonnable de dire que la goutte d'eau dans son ensemble, soutenue par une surface conductrice et proche d'une paille frottée, a acquis une charge nette. De plus, cette charge nette sur la goutte devrait être de signe opposé à celui de la paille frottée, comme le montre la figure 7.30 (c).

Un phénomène analogue se produit dans l'expérience de Desaguliers (l'expérience 2.8). Nous avons un filet d'eau douce qui coule d'un robinet. En raison des différences de potentiel élevées de cette expérience, ce filet d'eau se comporte comme un conducteur. De plus, en supposant un filet continu, il est mis à la terre par contact avec le robinet métallique, qui est en contact avec le sol. Supposons que nous déplaçons une paille en plastique chargée négativement près du filet. Ce dernier est initialement polarisé (en raison du mouvement et de la séparation des ions présents dans l'eau, comme H_3O^+ , OH^- , etc.), de manière analogue à la figure 7.29. La partie du filet la plus proche de la paille négative devient chargée positivement. D'autre part, les charges négatives dans la partie la plus éloignée du filet sont neutralisées en raison de sa mise à la terre. Ceci est analogue à la mise à la terre des figures 7.20, 7.22 et 7.30. Pour cette raison, le filet dans son ensemble devrait devenir chargé positivement, principalement dans la section la plus proche de la paille négative. Il existe alors une attraction entre les charges négatives de la paille en plastique et les charges positives du filet. Par conséquent, le filet dans son ensemble se courbe vers la paille. La figure 7.37 illustre la distribution des charges le long du filet.

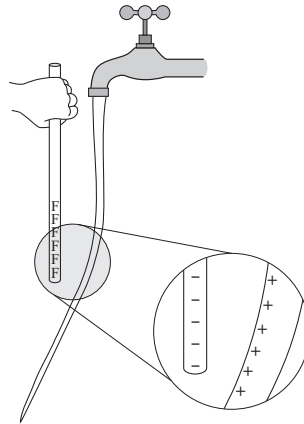


FIG. 7.37 : Charges électriques sur un filet d'eau à proximité d'une paille en plastique frottée.

7.12 Est-il possible d'électriser l'eau ?

L'eau se comporte comme un conducteur dans les expériences habituelles d'électrostatique. Il est donc possible de l'électriser comme on le fait habituellement avec les conducteurs solides. Pour ce faire, elle doit être placée sur un récipient isolant. De cette manière, on empêche sa décharge vers le sol.

Comme indiqué dans la section 7.11, dans l'expérience de Gilbert, une petite quantité d'eau a été attirée vers un morceau d'ambre frotté. Il est probable que l'eau dans son ensemble ait été électrisée dans cette situation. Mais Gilbert n'a pas analysé si l'eau avait été électrisée dans ce cas, il s'est contenté d'observer son attraction. Gray fut peut-être le premier, en 1731, à électriser de l'eau et à confirmer son électrisation.¹⁴ Il a placé de l'eau sur un support isolant en résine ou en verre. Il a ensuite approché un tube électrisé 3 ou 4 fois près de l'eau. Après ce procédé, il éloigna le tube électrisé de l'eau. En approchant un fil pendulaire, il observa qu'il était attiré par l'eau. Cela prouvait que l'eau avait été électrisée par le tube électrisé lorsque celui-ci était proche de l'eau. Le mécanisme de charge dans ce cas était probablement constitué de minuscules étincelles entre le tube et l'eau. Cela provoquait un transfert de charge du tube vers l'eau conductrice. L'eau pouvait stocker cette charge acquise grâce au fait qu'elle était maintenue sur un support isolant. Cette expérience a ensuite été confirmée par Du Fay.¹⁵

Avec les adaptations appropriées, il est possible de reproduire de nombreuses expériences du chapitre 7 en utilisant de l'eau dans un récipient en plastique, au lieu d'utiliser un carton fin fixé à une paille en plastique. Le comportement conducteur du carton sera assumé par l'eau. Le récipient en plastique évitera la mise à la terre électrique de l'eau, tout comme la paille en plastique isolait le carton de l'électroscope.

7.12.1 Le générateur électrostatique de Kelvin

L'une des expériences les plus fascinantes démontrant que l'eau se comporte comme un conducteur dans les situations habituelles d'électrostatique a été menée en 1867 par W. Thomson (Lord Kelvin), figure 7.38.

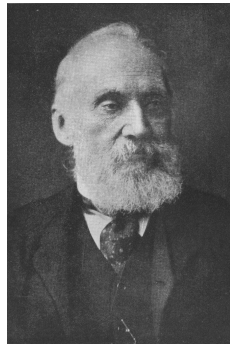


FIG. 7.38 : W. Thomson (Lord Kelvin) (1824–1907).

Il a construit un instrument connu sous le nom de « compte-gouttes », « machine électrique à gouttes d'eau », « générateur de gouttes d'eau » ou « générateur électrostatique de Kelvin ».¹⁶ Nous présentons ici les principaux aspects du générateur. Au

¹⁴[Gra31b] et [Hei99, p. 253].

¹⁵[DF33a, p. 34] et [DF33c, p. 84].

¹⁶[Tho], [Llo80] avec traduction portugaise dans [Llo07] et [CA08].

départ, l'eau est placée dans un récipient isolant, tel qu'un gobelet en plastique. Au fond de ce gobelet se trouve un trou ou un compte-gouttes. Au début de l'expérience, ils restent fermés. Nous connectons un anneau métallique au gobelet à l'aide d'un matériau isolant. L'anneau doit être très proche du trou ou du compte-gouttes, à quelques centimètres de celui-ci. Nous frottons une paille en plastique dans des cheveux pour la charger négativement. La paille négative est ensuite raclée sur l'anneau métallique afin de le charger négativement. Après ce procédé, la paille en plastique est éloignée de l'anneau. L'eau se comportant comme un conducteur, elle se polarise en raison de la présence de l'anneau négatif situé juste en dessous. La partie inférieure de l'eau devient chargée positivement, tandis que la partie supérieure, qui est en contact avec l'air, devient chargée négativement, figure 7.39 (a). Ce phénomène est analogue à la polarisation décrite dans la figure 7.29.

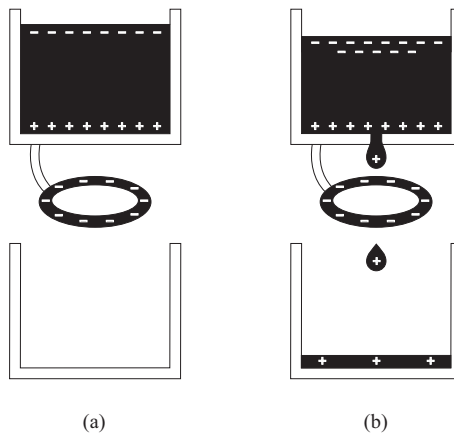


FIG. 7.39 : (a) Polarisation de l'eau due à l'anneau négatif situé à proximité. (b) Les gouttes d'eau tombent chargées positivement.

Une fois que l'anneau a été chargé négativement, nous ouvrons le trou ou le compte-gouttes. Les gouttes d'eau doivent passer par le centre de l'anneau, sans entrer en contact avec celui-ci. La partie inférieure de l'eau dans le récipient supérieur est chargée positivement. Par conséquent, il en sera de même pour les gouttes. Ces gouttes positives sont recueillies à l'intérieur d'un deuxième récipient isolant placé sous l'anneau, figure 7.39 (b). Tandis que les gouttes d'eau continuent de tomber, la quantité de charges accumulées dans le réceptacle inférieur augmente. Cette figure montre les principaux aspects du mécanisme de fonctionnement du générateur de Kelvin.

Normalement, le générateur de Kelvin fonctionne avec deux compte-gouttes. L'un des anneaux est électrisé positivement et l'autre négativement, figure 7.40. Un fil métallique avec une sphère métallique à son extrémité supérieure est connecté à l'intérieur de chaque réceptacle inférieur. Les deux sphères métalliques doivent être très proches l'une de l'autre, avec une distance typique de quelques millimètres. Les gouttes d'eau qui tombent à travers l'anneau négatif sont chargées positivement, celles qui tombent à travers l'anneau positif sont chargées négativement.

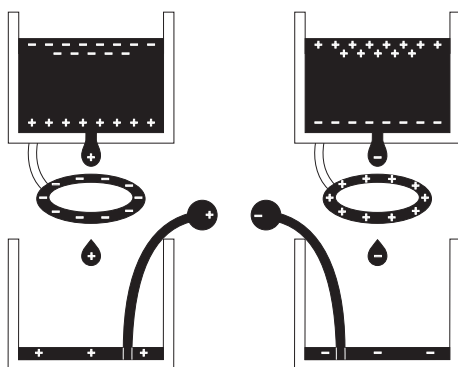


FIG. 7.40 : Première phase du processus de fonctionnement du générateur de Kelvin.

Au fil du temps, la quantité de charges accumulées dans chaque réceptacle inférieur augmente. Par conséquent, la différence de potentiel entre les deux sphères métalliques augmente également. L'air sec est normalement un bon isolant, en particulier si la force électrique par unité de charge est inférieure à une certaine limite. Lorsque la force par unité de charge est supérieure à cette limite, il devient conducteur et une décharge électrique se produit dans l'air, sous forme d'étincelle. Cette limite est appelée champ électrique de claquage ou claquage corona. À la pression atmosphérique, elle vaut environ 3×10^6 V/m. Lorsque la force électrique par unité de charge dans la région entre les deux sphères dépasse cette limite, il se produit une décharge électrique dans l'air, figure 7.41.

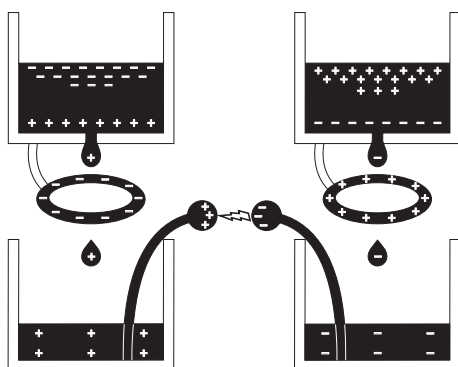


FIG. 7.41 : Décharge électrique entre les sphères de charges opposées.

Cette décharge neutralise les charges opposées qui s'étaient accumulées dans les réceptacles inférieurs. Si les gouttes continuent de tomber après l'étincelle, le processus se poursuit comme dans les figures 7.40 et 7.41. L'intervalle de temps entre deux étincelles consécutives dépendra de la fréquence des gouttes, de la distance entre les sphères métalliques, de la quantité de charge dans les anneaux et de la distance entre les anneaux et les compte-gouttes. Un ordre de grandeur typique est une étincelle

toutes les 10 secondes. Les étincelles se poursuivront tant que les gouttes continueront de tomber.

Cette expérience montre deux choses importantes. La première est que l'eau se comporte comme un conducteur dans les expériences habituelles d'électrostatique, comme nous l'avons vu dans les sections 6.3 et 7.11. La seconde est que si un corps électrisé se trouve à proximité de l'endroit où l'eau goutte, les gouttes d'eau se chargeront électriquement, avec une charge nette de signe opposé à celui des charges du corps électrisé voisin.

7.13 La conductivité de l'air

Expérience 7.25

Il est facile d'électriser un électroscope par temps sec. Il suffit de frotter une paille en plastique avec des cheveux, puis de racler cette paille sur le carton fin de l'électroscope, comme nous l'avons vu dans l'expérience 6.2, figure 6.5. L'électroscope reste chargé pendant plusieurs secondes ou quelques minutes après ce procédé. Cela signifie que l'air sec est un bon isolant.

Cependant, ce n'est pas un isolant parfait. Après plusieurs minutes, l'électroscope est totalement déchargé, comme nous l'avons vu dans l'expérience 6.21. Quoiqu'il en soit, l'air peut être considéré comme un bon isolant, selon la définition donnée dans la sous-section 6.7.1.

Expérience 7.26

L'expérience 7.25 est répétée par temps humide et pluvieux. La bande de l'électroscope reste relevée pendant que nous raclons la paille frottée sur le carton de l'électroscope, comme dans la figure 6.5 (b).

Nous retirons ensuite la paille frottée. La bande retombe peu après, revenant à la situation de la figure 6.5 (a). 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. C'est la présence d'eau dans l'air humide qui le fait se comporter comme un conducteur, car l'eau elle-même est un bon conducteur pour les expériences habituelles d'électrostatique, comme indiqué dans la section 7.11.

Expérience 7.27

Il existe un autre procédé simple qui peut influencer les propriétés isolantes de l'air. Nous répétons les expériences 6.2 et 7.25 par temps sec. L'électroscope est initialement électrisé. Sa bande reste relevée, comme dans la figure 7.42 (a).

Nous allumons une allumette ou un briquet à proximité de l'électroscope électrisé. La bande descend en quelques secondes, figure 7.42 (b). La bande ne remonte pas quand l'allumette est retirée, figure 7.42 (c).

Cette expérience montre que l'électroscope se décharge très rapidement lorsqu'il y a un feu à proximité.

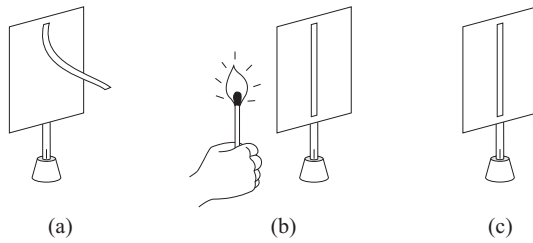


FIG. 7.42 : (a) Électroscope électrisé. (b) La bande descend en quelques secondes seulement lorsqu'on frotte une allumette ou un briquet à proximité. (c) La bande reste verticale quand l'allumette est retirée.

L'interprétation moderne de ce phénomène est que la flamme augmente considérablement l'ionisation de l'air. Avec l'augmentation du nombre de charges positives et négatives mobiles dans l'air, les charges au-dessus de l'électroscope sont rapidement neutralisées par ces ions. Avec l'augmentation de la conductivité de l'air, l'électroscope se décharge également par la main et le sol. Le feu fait que l'air se comporte comme un bon conducteur.

7.14 Comment décharger un isolant électrisé?

La mise à la terre est le moyen le plus simple de décharger un conducteur électrisé, comme nous l'avons vu dans les sections 4.5, 6.2 et 6.3. Pour ce faire, il suffit que le conducteur entre en contact avec le sol. Une autre méthode consiste à connecter le conducteur électrisé au sol à l'aide d'une substance conductrice (comme le corps humain ou un fil métallique).

Mais cette méthode ne permet pas de décharger un isolant électrisé. Cela est évident dans la première expérience qui a donné naissance à la science de l'électricité, l'effet de l'ambre, sections 2.1 et 2.2. Dans la figure 2.3, nous avons une paille frottée qui attire de petits morceaux de papier. La paille en plastique est tenue dans notre main tout en attirant les morceaux de papier. Malgré cela, la paille n'a pas été déchargée. C'est l'une des principales différences entre les conducteurs et les isolants, comme nous l'avons vu dans la section 7.1.

Expérience 7.28

Une paille en plastique est frottée avec des cheveux. Ensuite, la paille attire des morceaux de papier, comme dans l'expérience 2.1. Nous essayons ensuite de mettre la paille à la terre. Pour ce faire, nous connectons un fil métallique entre la terre et l'une des parties frottées de la paille. Après ce procédé, le fil métallique est retiré. Nous rapprochons à nouveau la paille des petits morceaux de papier. Nous observons que la paille attire toujours ces morceaux de papier.

Ce qui se passe dans cette expérience est simple à décrire. Seule la partie spécifique de la paille en plastique qui est entrée en contact avec le fil métallique a été

déchargée vers la terre. Autrement dit, les autres parties frottées de la paille ne sont pas déchargées par cette mise à la terre électrique. Après tout, ces charges ne peuvent pas se déplacer à travers la paille, car le plastique est un très bon isolant.

Dans la prochaine expérience, nous verrons trois procédés utilisés pour décharger un isolant électrisé.

Expérience 7.29

Trois pailles en plastique sont frottées de manière égale dans les cheveux. Nous les appelons pailles *I*, *II* et *III*. Après avoir été chargées, les pailles *II* et *III* sont maintenues verticalement sur des supports appropriés séparés, comme ceux du pendule électrique. Par exemple, elles peuvent être soutenues par des attaches-papier reliées à un gobelet en plastique rempli de pâte de gypse ou de ciment blanc, figure 7.43. Avec la paille *I*, nous répétons l'expérience 2.1 et observons qu'elle attire de petits morceaux de papier lorsqu'on l'approche d'eux.

Après quelques minutes ou quelques heures, cette expérience est répétée avec la paille *II*, qui n'a subi que le même frottement initial que les pailles *I* et *III*. Normalement, elle n'attirera qu'un très petit nombre de morceaux de papier, nettement moins que la paille *I*. Le nombre de morceaux de papier dépendra de la période d'attente après le frottement initial, du type de frottement, du type de plastique et des conditions météorologiques locales (c'est-à-dire s'il s'agit d'une journée sèche ou humide).

Le lendemain, cette expérience est répétée avec la paille *III*. Rien n'a été fait avec cette paille après le frottement initial. Nous observons qu'elle n'attire plus les petits morceaux de papier, figure 7.43.

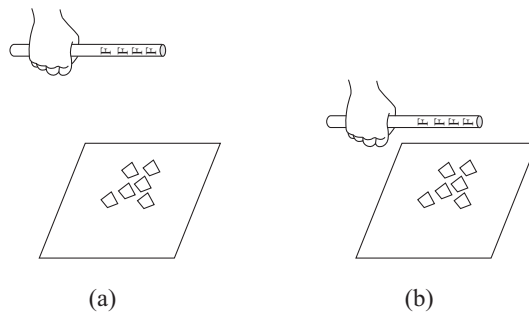


FIG. 7.43 : Une paille frottée perd son électrisation plusieurs heures après avoir été frottée. Elle n'attire plus les petits morceaux de papier lorsqu'on l'approche d'eux.

Le symbole F dans la figure 7.43 indique uniquement que la paille a été frottée il y a plusieurs heures. Rien d'autre n'a été fait avec cette paille. Malgré ce frottement, elle perd son électrisation après une longue période d'attente. Autrement dit, elle perd sa capacité à attirer de petits morceaux de papier lorsqu'on l'approche d'eux. Selon la définition de la section 2.1, cela signifie que la paille est redevenue électriquement neutre, comme elle l'était avant le frottement. Autrement dit, elle a perdu son électrisation, ou les charges qu'elle avait acquises pendant le processus de frottement. Ces

charges sont perdues dans l'air ambiant. Bien que l'air sec soit un bon isolant, il n'est pas parfait, comme expliqué dans la sous-section 6.7.1.

Expérience 7.30

Nous présentons maintenant le deuxième procédé pour décharger un isolant électrisé.

Au départ, nous frottons une paille en plastique dans des cheveux. Elle attire des morceaux de papier, comme dans l'expérience 2.1. Après cet essai, la paille en plastique est plongée dans un récipient rempli d'eau douce. La paille est retirée de l'eau. Nous rapprochons à nouveau la paille des morceaux de papier. Cette fois-ci, elle ne les attire plus, comme le montre la figure 7.43. Comme dans les autres expériences, nous devons seulement rapprocher la paille des morceaux de papier, en évitant qu'ils n'entrent en contact. Si ce contact a lieu, les morceaux de papier peuvent se coller à la paille en raison de son humidité. Nous pouvons également donner quelques coups sur la paille après l'avoir retirée de l'eau, ou souffler légèrement dessus, afin d'éliminer l'excès d'eau à sa surface.

Cette expérience montre que la paille frottée a perdu son pouvoir d'attraction après avoir été immergée dans l'eau. Cela signifie que l'eau a neutralisé la paille. Cette neutralisation est à nouveau due au pouvoir conducteur de l'eau douce. Lorsque l'eau entre en contact intime avec toutes les parties frottées de la paille en plastique qui ont été électrisées par frottement, elle neutralise ces charges superficielles grâce au grand nombre d'ions positifs et négatifs mobiles qu'elle contient. La différence par rapport à l'expérience 7.28 est que nous avons maintenant une mise à la terre de toutes les parties électrisées de la paille frottée, qui sont alors simultanément neutralisées.

Expérience 7.31

Le troisième procédé pour décharger un isolant électrisé est également très simple.

Au départ, nous chargeons une paille en plastique en la frottant dans des cheveux. Elle attire alors des morceaux de papier, comme dans l'expérience 2.1. Nous éloignons la paille frottée de la table. Après ce procédé, nous allumons une allumette ou un briquet à proximité de la paille. La flamme devrait se déplacer près de toutes les parties de la paille frottée, comme dans la figure 7.44.

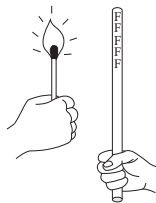


FIG. 7.44 : Nous craquons une allumette près d'une paille frottée.

Après ce procédé, la paille est à nouveau approchée des morceaux de papier. Cette fois-ci, elle ne les attire plus, comme le montre la figure 7.43. La paille a été déchargée

grâce à ce procédé.

Comme nous l'avons vu dans la section 2.6, Gilbert a été le premier à décrire ce phénomène. Il a observé qu'une flamme empêchait les attractions habituelles exercées par les substances frottées. Au lieu d'observer l'attraction ou l'absence d'attraction exercée sur les morceaux de papier, il a analysé si l'ambre frotté orientait ou non un versorium situé à proximité. Comme il l'a dit,¹⁷

[les électriques frottés] n'ont aucun effet sur un versorium s'il est très proche, de n'importe quel côté, de la flamme d'une lampe.

Il a interprété ce fait en supposant que la flamme consommait les effluves supposés émis par les substances frottées. Il pensait que les attractions habituelles exercées par l'ambre frotté étaient dues à l'action de ces effluves émis.

De nos jours, nous avons une autre interprétation de ce phénomène. Ce qui s'est passé dans ce cas est analogue à la situation décrite dans l'expérience 7.27. En effet, la flamme augmente considérablement l'ionisation des molécules d'air. Par conséquent, l'air commence à se comporter comme un bon conducteur, car il contient désormais un grand nombre d'ions mobiles positifs et négatifs. Le contact intime entre cet air ionisé et toutes les parties de la paille frottée neutralise les charges qui se trouvaient sur toute la surface du plastique. De cette manière, la paille perd les charges qu'elle avait acquises par frottement. Elle n'attire donc plus les petits morceaux de papier.

7.15 Un petit morceau de papier est-il attiré avec une force plus importante lorsqu'il se trouve au-dessus d'un isolant ou d'un conducteur ?

Expérience 7.32

Nous choisissons un sac en plastique qui agit comme un isolant, c'est-à-dire qui ne décharge pas un électroscope électrisé lorsque les deux sont en contact. Nous découpons plusieurs morceaux de ce sac en plastique et plusieurs morceaux d'une feuille de papier. Nous créons ensuite deux surfaces : une surface isolante constituée d'une plaque de polystyrène et une surface conductrice constituée d'une feuille de papier (ou d'une table ou d'une plaque métallique). Un groupe de morceaux de plastique, le groupe *I*, est placé sur la plaque de polystyrène. Sur la même plaque, nous plaçons également un groupe de morceaux de papier, le groupe *II*, séparé du premier groupe. Sur la surface conductrice, un autre groupe de morceaux de plastique, le groupe *III*, est placé. Sur la même surface conductrice, mais séparé du troisième groupe, nous plaçons un groupe de morceaux de papier, le groupe *IV*.

Avant de commencer l'expérience, il est important de vérifier que les petits morceaux de plastique sur la plaque de polystyrène et la feuille de papier sont bien neutres. Il arrive parfois que ces morceaux de plastique s'électrisent lors de leur manipulation, lorsque nous les coupons, etc. Pour vérifier cette neutralité de charge, nous approchons une paille en plastique neutre de ces petits morceaux de plastique. S'il n'y a

¹⁷[rubbed electrics] have no effect on a versorium if it have very near it on any side the flame of a lamp.

pas d'attraction entre eux, les morceaux de plastique peuvent être considérés comme neutres. S'ils sont attirés par la paille neutre, cela signifie que les morceaux de plastique sont électrisés. Si cela se produit, nous devons attendre plusieurs heures jusqu'à ce qu'ils se déchargent naturellement dans l'air. Nous pouvons alors commencer l'expérience.

Nous frottons maintenant une paille en plastique dans des cheveux. Nous approchons la paille horizontale de chacun de ces quatre groupes. Nous observons que la force la plus importante s'exerce sur le groupe *IV*, les morceaux de papier sur la surface conductrice, suivi du groupe *II*, les morceaux de papier sur la surface isolante. Les groupes *I* et *III*, les morceaux de plastique sur l'une ou l'autre surface, sont très faiblement attirés, et il est difficile de distinguer lequel subit la plus grande attraction. La force peut être estimée de deux manières. La première consiste à observer la distance à laquelle la force commence à être détectée, comme l'indique le mouvement des morceaux de papier ou de plastique. Plus la distance est grande, plus la force est forte, figure 7.45. La deuxième méthode consiste à observer le nombre de morceaux de papier ou de plastique qui sont attirés par la paille frottée lorsqu'elle se trouve à une distance constante de la table (par exemple 5 ou 10 cm).

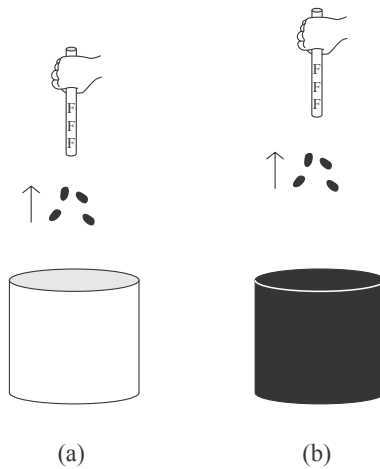


FIG. 7.45 : (a) Des morceaux de papier soutenus par une surface isolante sont attirés par une paille frottée. (b) Des morceaux de papier soutenus par une surface conductrice sont attirés par une paille frottée. La distance minimale à laquelle la paille peut attirer les morceaux de papier est plus grande dans le cas (b) que dans le cas (a). Les flèches indiquent la direction du mouvement.

Expérience 7.33

Nous utilisons désormais un pendule électrique composé d'un disque en papier soutenu par un fil de soie. Nous frottons une paille en plastique *I* dans des cheveux afin qu'elle se charge négativement. Elle est ensuite placée sur un support approprié, loin du pendule. Une deuxième paille est chargée positivement en la frottant entre

deux tuyaux en caoutchouc dur. Elle est également placée loin du pendule et de la première paille.

Nous touchons le disque de papier avec notre doigt. Nous approchons ensuite lentement la paille *I* de celui-ci. Le pendule est attiré par la paille. Nous ne les laissons pas entrer en contact. Après avoir retiré la première paille, nous approchons la deuxième paille du pendule. Le pendule est également attiré par cette paille. Nous les empêchons également d'entrer en contact.

Nous tenons maintenant une feuille de papier (ou une plaque métallique) et la plaçons en biais sous le disque de papier, du côté opposé à la paille, figure 7.46. La feuille de papier doit toucher le disque.

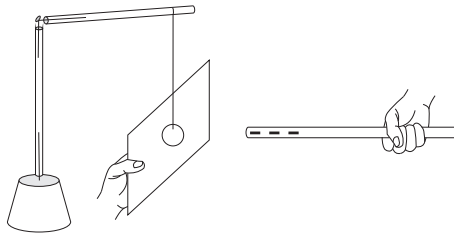


FIG. 7.46 : Au départ, le disque en papier d'un pendule électrique touche la feuille de papier ou la plaque métallique.

Nous approchons ensuite la première paille du pendule de manière à ce que celui-ci reste entre la feuille de papier et la paille. À une certaine distance, le disque se déplace vers la paille, s'éloignant de la feuille de papier. Lorsque cela se produit, nous retirons la feuille de papier, mais en empêchant le disque et la paille d'entrer en contact. Après cela, la paille peut également être retirée et le pendule revient à la verticale. Si nous rapprochons à nouveau la paille *I* du pendule, nous observons une attraction entre les deux. Il faut empêcher qu'ils entrent en contact.

Nous retirons ensuite la première paille et rapprochons lentement la paille *II* du pendule. Il ne faut pas la rapprocher trop près du disque et nous devons observer attentivement dans quelle direction le disque a tendance à se déplacer. Lorsque cette expérience est réalisée avec soin, nous observons que le disque a tendance à s'éloigner de la paille *II*, car il en est repoussé ! Cela indique que les deux corps ont des charges de même signe : positives. Si la paille *II* s'approche trop près du disque, il y aura une attraction entre eux, comme on le voit dans la section 7.10. Cela doit être évité.

Expérience 7.34

L'expérience 7.33 peut être répétée en inversant l'ordre dans lequel les pailles sont rapprochées. Autrement dit, on rapproche d'abord la paille *II*, qui est chargée positivement, du disque en papier qui touche la feuille de papier. Cette feuille de papier doit être retirée lorsque le disque en papier se rapproche de la paille. Il faut empêcher les deux éléments d'entrer en contact. Une fois la feuille de papier retirée, la deuxième paille doit également être retirée. Si nous rapprochons maintenant lentement la paille *I* du disque de papier, nous observerons une répulsion entre les deux.

Cela indique que les deux ont des charges négatives. Autrement dit, la charge acquise par le disque de papier est de signe opposé à la charge de la deuxième paille.

Expérience 7.35

Nous répétons les expériences 7.33 et 7.34, mais cette fois-ci en posant le disque de papier sur une plaque en polystyrène. À la fin de cette expérience, nous observons que le disque de papier est attiré par les deux pailles, *I* et *II*, quelle que soit celle qui a été déplacée en premier vers lui.

Les expériences 7.33 et 7.34 montrent que lorsqu'un morceau de papier (dans ce cas, le disque en papier), posé sur une feuille de papier conductrice, est attiré par une paille électrisée, il se produit une électrisation du morceau de papier. De plus, la charge qu'il acquiert après avoir touché la feuille de papier et s'en être éloigné est de signe opposé à celui de la paille électrisée. L'expérience 7.35, en revanche, montre qu'un morceau de papier, lorsqu'il est posé sur une plaque de polystyrène isolante, n'acquiert aucune charge nette après avoir été attiré par une paille électrisée. Autrement dit, il n'y a pas de charge nette sur le petit morceau de papier après qu'il a été éloigné de la plaque de polystyrène.

Chapitre 8

Considérations finales

8.1 Changement de noms et de significations : des corps électriques et non électriques aux isolants et conducteurs

En 1600, Gilbert avait classé les corps en deux catégories : électriques et non électriques, sections 2.7 et 2.8. Les matériaux électriques, comme l'ambre, étaient ceux qui, après avoir été frottés, acquéraient la propriété d'attirer les substances légères à proximité. Les matériaux non électriques n'acquéraient pas cette propriété par frottement. Tous les métaux, en particulier, faisaient partie des corps non électriques.

En 1729, Gray découvrit qu'en plaçant un corps électrisé, tel que du verre flint frotté, en contact ou à proximité d'un métal, ce dernier acquérait la propriété d'attirer les substances légères situées à proximité. Nous avons vu des expériences démontrant cet effet dans la section 7.4. Les procédés de Gray seront discutés en détail dans l'annexe B. Le même comportement attractif se produisait également avec d'autres corps classés comme non électriques à l'époque de Gray. Du Fay a découvert le mécanisme *ACR*, démontrant qu'un mince morceau de métal s'électrisait au contact d'un autre corps frotté, section 4.8. Plus tard, on a appris à électriser un morceau de métal par induction en utilisant la polarisation électrique et la mise à la terre, section 7.5. Dans les années 1770, on découvrit que les métaux pouvaient également être électrisés par friction, à condition qu'ils soient isolés de la Terre, section 6.8. Ces découvertes conduisirent à l'abandon de la nomenclature et du système de classification de Gilbert.

Depuis lors, nous avons adopté une autre classification. Les substances sont désormais classées en « conducteurs » et « isolants ». Ces expressions sont dues à Du Fay et Desaguliers, sous-section 6.3.1. La plupart des corps que Gilbert classait comme électriques sont désormais appelés isolants. Les corps qui étaient appelés non électriques sont désormais appelés conducteurs. Il y a ici une nouveauté conceptuelle. Il ne s'agit pas seulement d'un changement de nom ou d'une simple modification de nomenclature. Après tout, il est possible de faire en sorte que les métaux attirent les substances légères après avoir été frottés, à condition que les métaux soient isolés pendant le

frottement. Il en va de même pour d'autres matériaux isolés. C'est la distinction de Gilbert qui n'a plus de sens. Ce qui caractérise les conducteurs idéaux, c'est le fait qu'ils possèdent des charges électriques mobiles et permettent le passage ou le flux de charges à travers eux. Les isolants idéaux, en revanche, ne possèdent pas de charges mobiles, sauf à l'intérieur de leurs molécules. De plus, les isolants ne permettent pas le passage ou le flux de charges à travers eux.

Il existe une gradation entre les bons conducteurs et les bons isolants. De plus, ces propriétés dépendent non seulement des propriétés intrinsèques de ces corps, mais aussi des conditions externes auxquelles ils sont soumis. Quoi qu'il en soit, la distinction entre les substances conductrices et isolantes est l'une des caractéristiques les plus importantes de toute la science de l'électricité.

8.2 Faits simples et élémentaires sur l'électricité

Après avoir réalisé les expériences décrites dans cet ouvrage, nous avons acquis des connaissances raisonnables sur l'électricité. Il est évident que nous n'avons pas couvert tous les aspects possibles du sujet. Quoi qu'il en soit, nous avons désormais une idée précise des principaux faits liés à l'électricité. Dans cette section, nous présentons, pour reprendre les termes de Du Fay, les faits ou principes simples et primitifs relatifs à l'électricité.¹ Nous nous contentons ici de décrire ces faits observés, sans les expliquer. Nous pouvons donc les considérer comme primitifs. Autrement dit, nous pouvons utiliser ces principes simples pour expliquer d'autres phénomènes et des expériences plus complexes, mais les principes fondamentaux eux-mêmes ne sont pas expliqués. Il n'est jamais possible de tout expliquer. Il est toujours nécessaire de partir de certains faits initiaux et de les considérer comme vrais. Nous utilisons ensuite ces hypothèses primitives pour expliquer d'autres observations de la nature. Voici les faits primitifs :

1. Les corps naturels peuvent se trouver dans trois états différents appelés « électriquement neutre », « chargé positivement » et « chargé négativement ». On dit également qu'ils ont respectivement « une charge nulle », « une charge positive » et « une charge négative ». On peut également dire que les corps « ne sont pas électrisés », « sont électrisés positivement » ou « sont électrisés négativement ».
2. Ces états sont caractérisés par le comportement observé des corps. Deux corps neutres ne s'attirent ni ne se repoussent. 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. Les corps ayant des charges de signe opposé s'attirent. Les corps ayant des charges de même signe se repoussent normalement, mais dans certaines situations, ils peuvent également s'attirer.
3. 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

¹[DF34c, p. 525].

également lorsque la force de la charge dans les corps augmente. 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, mais dans des directions opposées.

4. 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 charges mobiles et permettent le passage ou le flux de charges électriques à travers eux. Les isolants, en revanche, n'ont pas de charges mobiles, sauf à l'intérieur de leurs molécules. Les isolants ne permettent pas le passage ou le flux de charges à travers eux.
5. Les conducteurs et les isolants peuvent être électriquement neutres, positifs ou négatifs. 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. Une autre façon d'effectuer cette classification consiste à toucher une extrémité du corps dans le carton d'un électroscope électrisé et à toucher l'autre extrémité du corps 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.
6. Un corps qui se comporte comme un isolant lorsqu'il est soumis à une faible différence de potentiel électrique peut se comporter comme un conducteur lorsque cette différence de potentiel dépasse une certaine valeur. La majorité des corps solides et liquides se comportent comme des conducteurs dans les expériences habituelles d'électrostatique, car peu d'entre eux sont des isolants. Parmi les isolants, on peut citer l'air sec, l'ambre, la soie et la plupart des plastiques et des résines.
7. Le comportement d'un corps en tant que conducteur ou isolant dépend également d'autres aspects. Supposons qu'une extrémité du corps touche le carton d'un électroscope chargé, tandis que l'autre extrémité touche le sol. Les facteurs qui influencent les propriétés de ce corps sont les suivants : (a) Le temps nécessaire pour décharger un 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); Et (c) la section transversale du corps (plus cette section est grande, plus la décharge sera rapide).
8. Les corps neutres peuvent être chargés par plusieurs mécanismes. Le procédé le plus courant est le frottement de deux corps neutres. Après le frottement, l'un des corps frottés devient positif et l'autre négatif. Les isolants ne sont chargés que sur la partie frottée de leur surface. La charge acquise par les conducteurs frottés, en revanche, se répand sur les surfaces extérieures des conducteurs lorsque ceux-ci sont complètement entourés d'isolants, ou va à la terre s'il y a un contact conducteur avec la terre.
9. Un conducteur neutre peut également acquérir une charge à partir d'un isolant chargé lorsqu'ils sont mis en contact l'un avec l'autre, sans aucune friction. La

charge acquise par le conducteur a le même signe que l'isolant chargé. 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 chargé est négligeable lorsqu'il n'y a pas de friction entre eux.

10. Les conducteurs se polarisent électriquement en présence d'un corps chargé à proximité. La partie du conducteur la plus proche du corps chargé s'électrise avec une charge de signe opposé à celui du corps chargé à proximité. La partie la plus éloignée du conducteur s'électrise avec une charge de même signe que le corps à proximité lorsque le conducteur est isolé électriquement. Si le conducteur est isolé et s'il est séparé en deux parties en présence du corps chargé proche, les deux parties seront électrisées avec des charges de signe opposé.
11. Si le conducteur est mis à la terre électriquement en présence du corps chargé proche, la partie du conducteur la plus éloignée du corps chargé sera neutralisée. Ce fait permet à un conducteur d'être électrisé avec une charge de signe opposé à celui du corps proche.
12. 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 devient électrisée avec le 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.
13. Le nombre de charges polarisées dans les conducteurs proches d'un corps chargé augmente lorsque la distance entre eux diminue. Il en va de même pour les charges polarisées effectives des isolants proches d'un corps chargé.
14. La polarisation des conducteurs et des isolants augmente lorsque le degré d'électrisation du corps chargé voisin augmente.
15. Une force d'origine non électrostatique maintient les charges à la surface des conducteurs et des isolants au repos lorsque ces corps sont électrisés ou polarisés. 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.

Lorsque nous décrivons ces faits simples, nous devons garder à l'esprit que nous parlons en termes généraux, en nous référant implicitement aux expériences décrites dans 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 entre eux, nous ne tenons pas compte de l'attraction gravitationnelle entre eux. La raison en est que cette interaction gravitationnelle n'est pas observée ou ne peut être détectée dans les expériences ordinaires impliquant des corps petits et légers. Elle ne montre son effet que lorsqu'au moins l'un des corps a des dimensions astronomiques,

comme notre propre Terre. Lorsque nous disons qu'un corps chargé attire un corps initialement neutre, nous supposons que nous avons affaire à des corps légers ou à des corps soutenus par des cordes 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 neutres pourront se déplacer près du corps chargé lorsqu'il y a une attraction entre eux. De plus, afin d'observer cet effet d'attraction, la distance entre les corps en interaction ne peut pas être très grande et la charge sur le corps frotté ne doit pas être très faible, sinon ces effets ne sont pas perceptibles. Il en va de même pour les autres principes.

8.3 Description de l'effet de l'ambre

Ces principes primitifs peuvent être utilisés pour expliquer ou décrire des phénomènes plus complexes. Mais ici, nous les utiliserons pour décrire ce qui s'est passé dans l'expérience 2.1, qui est analogue à l'effet de l'ambre, la première expérience de l'histoire de l'électricité. Dans cette expérience, une paille en plastique non frottée n'attirait pas les petits morceaux de papier, tandis qu'une paille frottée les attirait lorsqu'on l'approchait d'eux, comme le montrent les figures 2.1 et 2.3. L'expérience 2.11 a donné un résultat différent. Dans ce cas, une brochette en bois, frottée ou non, n'attirait pas les morceaux de papier, figure 2.9. Dans les expériences 2.3, 7.18 et 7.20, nous avons observé qu'une paille en plastique frottée exerce une force plus importante sur de petits morceaux de papier que sur de petits morceaux de plastique d'environ le même poids et la même forme que le papier. Dans les expériences 7.32 à 7.35, il a été démontré que les morceaux de papier reposant sur une surface conductrice subissent une attraction plus forte de la part d'une paille frottée à proximité que les morceaux de papier reposant sur une surface isolante. De plus, les morceaux de papier qui reposaient au-dessus d'une surface conductrice acquièrent une charge nette après avoir été attirés par un corps chargé à proximité. La charge nette acquise par les morceaux de papier a un signe opposé à celui du corps proche qui les a attirés.

Dans ces expériences, les corps se comportant comme des isolants étaient l'air, la paille en plastique frottée, le fil de soie du pendule électrique, l'assiette en polystyrène et les petits morceaux de plastique qui étaient attirés. La paille en plastique a été frottée avec des cheveux. D'après ce qui a été observé dans la section 5.4, la paille a acquis une charge négative. Même si elle était tenue dans notre main, elle ne s'est pas déchargée car le plastique est un isolant.

Les corps agissant comme des conducteurs dans ces expériences étaient le sol, le corps humain, la brochette en bois, le disque en papier du pendule électrique, la feuille de papier qui soutenait ce disque en papier au-dessus d'elle et les petits morceaux de papier attirés par la paille. Il n'était pas possible d'attirer les morceaux de papier avec une brochette frottée. Lorsque la brochette était frottée, elle pouvait acquérir momentanément une charge électrique. Mais comme elle se comportait comme un conducteur dans cette situation et qu'elle était tenue dans notre main en contact avec la Terre, le bois était mis à la terre. Par conséquent, toute charge apparaissant sur la brochette pendant le processus de frottement était immédiatement neutralisée. De ce fait, elle n'attirait pas les petits morceaux de papier, même après avoir été frottée. Un conducteur ne peut conserver les charges qu'il acquiert par frottement que lorsqu'il

est isolé, comme le montre la section 6.8.

La paille en plastique peut être frottée avec des isolants (des cheveux, un tissu en soie ou un sac en plastique) ou avec des conducteurs (notre main, une feuille de papier ou un tissu en coton). Il n'est pas essentiel de savoir si cette substance est un isolant ou un conducteur. Mais le signe de la charge acquise par la paille en plastique dépendra du type de matériau avec lequel elle a été frottée, c'est-à-dire un isolant ou un conducteur.

L'attraction exercée par la paille frottée sur un morceau de plastique peut être illustrée microscopiquement à l'aide d'un pendule en plastique. Comme toujours, il faut veiller à utiliser un disque en plastique découpé dans un sac en plastique qui se comporte comme un isolant. De plus, ce disque en plastique doit être neutre lorsqu'il est éloigné d'autres corps électrisés. Dans ce cas, lorsque nous approchons la paille frottée du disque en plastique du pendule, nous observons une faible attraction entre les deux. On suppose que les molécules de plastique sont polarisées en présence du plastique frotté. La partie de chaque molécule qui est la plus proche du corps frotté s'électrise avec une charge de signe opposé. La partie de chaque molécule qui est la plus éloignée du corps frotté s'électrise avec une charge du même signe que ce corps. Ceci est illustré dans la figure 8.1 (a). L'intérieur du plastique polarisé se comporte macroscopiquement comme s'il était neutre, en raison de l'annulation des charges voisines de signes opposés. Mais la surface du plastique polarisé se comporte comme si elle avait une charge effective, comme illustré dans la figure 8.1 (b).

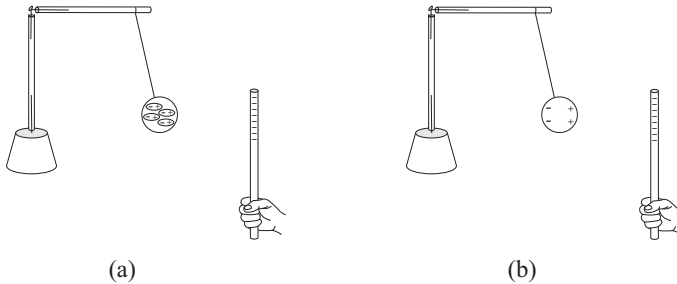


FIG. 8.1 : (a) Un plastique frotté polarisant et attirant un disque en plastique. (b) Polarisation efficace du disque en plastique.

On suppose que les molécules de plastique sont polarisées par la présence de la paille frottée à proximité en raison de l'existence de charges positives et négatives dans chaque molécule. De plus, ces charges positives et négatives doivent être mobiles à l'intérieur de chaque molécule. La polarisation de chaque molécule est également due au fait que les charges de même signe se repoussent, tandis que les charges de signe opposé s'attirent. Une force d'origine non électrostatique empêche ces charges polarisées de s'éloigner indéfiniment les unes des autres. Plus la charge sur la paille en plastique électrisée est forte, plus la polarisation du disque en plastique sera forte. Cette polarisation augmente également lorsque la distance entre la paille et le disque diminue. Plus cette polarisation effective du disque en plastique est importante, plus la force nette qui s'exerce sur lui sera forte.

La polarisation du plastique ne change pas beaucoup s'il est soutenu par une plaque isolante en polystyrène ou une feuille de papier conductrice. Dans ces deux cas, le plastique ne reçoit pas de charge nette.

L'attraction observée entre la paille frottée et le plastique polarisé peut être une conséquence d'une autre propriété des forces électriques : les forces d'attraction et de répulsion augmentent en intensité lorsque les distances entre les charges diminuent. Par conséquent, la force d'attraction entre la paille frottée et les charges effectives réparties sur la surface du plastique la plus proche de la paille est supérieure à la force de répulsion entre la paille et les charges effectives de même signe réparties sur la surface du plastique la plus éloignée de la paille. La somme de ces deux forces n'est pas nulle. La force d'attraction est supérieure à la force de répulsion. Ces forces partielles d'amplitude différente génèrent une force d'attraction nette entre la paille frottée et le plastique polarisé.

Analysons maintenant l'attraction exercée par la paille frottée sur un conducteur tel qu'un petit morceau de papier. Nous supposons initialement que ce morceau de papier est le disque en papier d'un pendule électrique suspendu par un fil de soie ou de nylon (matériaux isolants). Ce cas diffère de celui du disque en plastique de deux manières. La première est que la polarisation d'un conducteur est due au mouvement de charges libres sur le volume du conducteur. Autrement dit, il existe une véritable polarisation macroscopique du conducteur, et pas seulement une polarisation de ses molécules, figure 8.2.

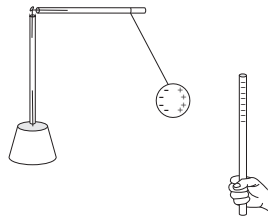


FIG. 8.2 : Une paille frottée polarisant et attirant un disque en papier.

La deuxième différence réside dans le fait que cette polarisation est plus intense que la polarisation effective d'un isolant en présence de la paille frottée. Il en résulte une force plus importante exercée par la paille frottée sur le disque en papier que celle exercée par la paille frottée sur un disque en plastique. Nous supposons ici que les disques en papier et en plastique ont la même forme et la même taille, et qu'ils se trouvent tous deux à la même distance de la paille frottée. Nous pouvons remarquer cette deuxième différence en comparant les figures 8.1 et 8.2. Le fil de soie du pendule avec un disque en papier est plus incliné par rapport à la verticale que le fil de soie du pendule avec un disque en plastique. Dans les deux situations, la distance entre la paille frottée et le pendule est la même. Cela indique que la force exercée sur le papier conducteur est supérieure à celle exercée sur le plastique isolant. Une fois de plus, une force d'origine non électrostatique empêche ces charges polarisées de se séparer davantage les unes des autres et de s'envoler dans l'air au-delà du disque en papier. C'est cette force d'origine non électrostatique qui maintient les charges polarisées au

bord du disque en papier, les empêchant de se décharger dans l'air.

Si le disque de papier est mis à la terre alors qu'il est polarisé, les charges sur le disque qui sont éloignées de la paille frottée sont neutralisées par les charges de la Terre en raison de la mise à la terre. Cela est analogue à ce que nous avons vu dans la figure 7.30. Dans ce cas, ce disque de papier a une charge nette différente de zéro, de signe opposé à celui de la paille frottée voisine. Par conséquent, ce disque de papier chargé subit une force d'attraction plus forte de la part de la paille frottée que la force exercée par la paille frottée sur le disque polarisé. La raison en est que, dans la situation actuelle, la répulsion qui existait auparavant entre la paille frottée et les charges de même signe qui étaient réparties sur la surface la plus éloignée du disque de papier n'existe plus, figure 8.3.

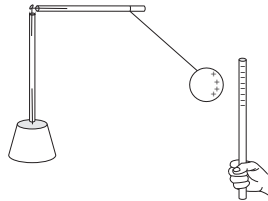


FIG. 8.3 : Un disque en papier électrisé attiré par une paille frottée.

Dans la figure 8.4, nous comparons ces trois cas. Nous supposons que dans tous les cas, la paille frottée se trouve à la même distance du pendule électrique. Dans (a), une faible force d'attraction s'exerce sur un disque en plastique polarisé par une paille électrisée située à proximité. Dans (b), une force plus importante s'exerce sur un disque conducteur qui est plus fortement polarisé. Dans (c), une force d'attraction encore plus importante s'exerce par une paille électrisée sur un disque conducteur chargé.

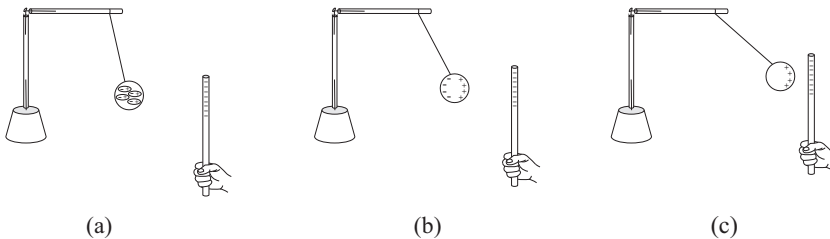


FIG. 8.4 : (a) Un isolant polarisé attiré par un corps électrisé proche. (b) Un conducteur polarisé attiré. (c) Un conducteur chargé attiré. La force augmente de (a) à (c), la paille frottée se trouvant à la même distance des pendules électriques.

La description microscopique de ce qui se passe avec le petit morceau de papier (un conducteur) posé sur une plaque de polystyrène (un isolant) lorsque nous approchons une paille électrisée dans l'expérience 7.32 est illustrée dans la figure 8.5.

Le papier conducteur est représenté par le rectangle noir. Le polystyrène isolant est représenté par le grand rectangle blanc. Lorsqu'une paille électrisée est placée au-dessus du papier, mais loin de celui-ci, le papier et le polystyrène se polarisent,

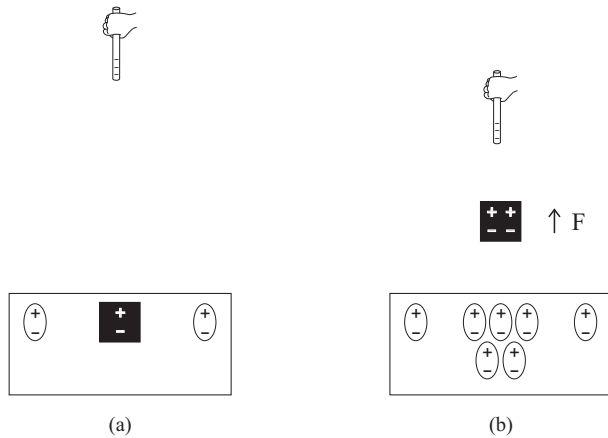


FIG. 8.5 : (a) Un morceau de papier polarisé posé sur une plaque de polystyrène polarisée en présence d’une paille électrisée éloignée du papier. (b) En rapprochant la paille du papier, nous augmentons la polarisation du papier et du polystyrène. Cela crée une force électrostatique d’attraction sur le papier, qui peut être supérieure à son poids. Si cela se produit, le papier se déplace vers la paille.

figure 8.5 (a). Une force d’attraction électrostatique apparaît entre la paille et le morceau de papier. Comme cette force électrostatique est inférieure au poids du papier, celui-ci ne se déplace pas vers la paille. En rapprochant encore plus la paille du papier, nous augmentons la polarisation du papier et du polystyrène. Cela augmente la force d’attraction entre la paille et le papier. Lorsque la distance entre la paille et le papier est inférieure ou égale à une certaine valeur d_1 , la force électrostatique devient supérieure au poids du papier. Le papier se déplace alors vers la paille, figure 8.5 (b). La force de la force est indiquée par la taille de la flèche.

Des processus différents se produisent lorsque le morceau de papier conducteur est initialement soutenu par une feuille de papier conductrice, figure 8.6.

Le morceau de papier conducteur est représenté par le petit rectangle noir, tandis que la feuille de papier conductrice est représentée par le grand rectangle noir. En plaçant une paille électrisée au-dessus du papier, mais loin de celui-ci, nous créons une redistribution des charges au sol. Par conséquent, la surface du morceau de papier et la surface de la feuille de papier s’électrisent avec des charges de signe opposé à la charge de la paille, figure 8.6 (a). Une force d’attraction électrostatique est alors générée entre le morceau de papier et la paille. Comme cette force électrostatique est inférieure au poids du morceau de papier, celui-ci ne se déplace pas vers la paille. En rapprochant encore plus la paille du morceau de papier, nous augmentons l’électrisation du morceau de papier et de la feuille de papier. Lorsque la distance entre la paille et le morceau de papier est inférieure ou égale à une certaine valeur d_2 , la force électrostatique devient supérieure au poids du morceau de papier. Il commence alors à se déplacer vers la paille, figure 8.6 (b). Cette distance d_2 est supérieure à la distance précédente d_1 , figure 7.45.

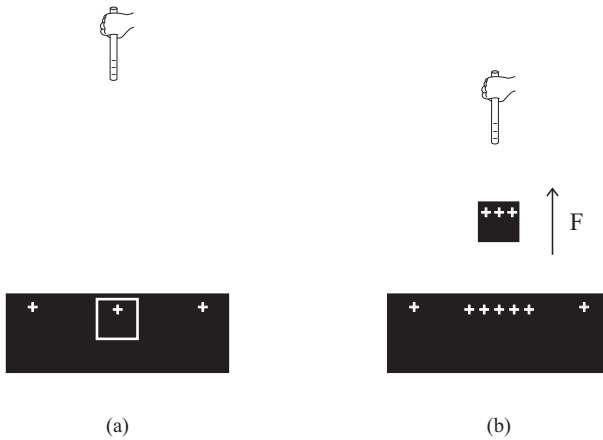


FIG. 8.6 : (a) Un morceau de papier électrisé posé sur une feuille de papier électrisée en présence d’une paille électrisée éloignée du papier. (b) En rapprochant la paille du morceau de papier, nous augmentons l’électrisation du morceau de papier et de la feuille de papier. Cela génère une force électrostatique sur le morceau de papier qui peut être supérieure à son poids. Le morceau de papier peut alors se déplacer vers la paille.

Supposons que les morceaux de papier se déplacent dans l’air, attirés par la paille frottée. Nous comparons ici deux cas. Dans le premier cas, le morceau de papier était initialement soutenu par une surface isolante. Dans le second cas, le morceau de papier était initialement soutenu par une surface conductrice. Nous supposons que la paille se trouve à la même distance des deux surfaces. Nous supposons également que les deux morceaux de papier se trouvent à mi-chemin entre les surfaces inférieures et la paille. Les forces sont indiquées par la taille des flèches. Elle est plus faible dans la première situation que dans la seconde. Cela peut être visualisé en comparant les figures 8.5 et 8.6, figure 8.7. La raison de cette différence est que dans le second cas, il y a une charge nette sur le morceau de papier, de signe opposé à la charge sur la paille. Ce n’est pas le cas dans la première situation. De plus, il y a également une force répulsive sur le morceau de papier exercée par la surface conductrice inférieure dans la seconde situation. Cela est dû au fait que ces deux corps ont des charges de même signe.

Dans l’expérience 2.1, il n’est pas facile de détecter la charge nette sur le morceau de papier lorsqu’il se déplace vers la paille frottée, après avoir été retiré de la surface du sol ou d’une table. Cependant, cela peut être démontré par des observations attentives, comme indiqué dans les expériences 7.33 et 7.34. Dans la figure 8.7, nous illustrons microscopiquement ce qui se passait dans la figure 7.45.

Beaucoup de gens sont surpris que dans la plus ancienne expérience sur l’électricité, comme celle de l’expérience 2.1, la substance légère et le sol se comportent comme des conducteurs. Plus surprenant encore est le fait que, en général, la substance légère a une charge nette lorsqu’elle se déplace vers le plastique frotté. Malgré ces surprises, c’est la

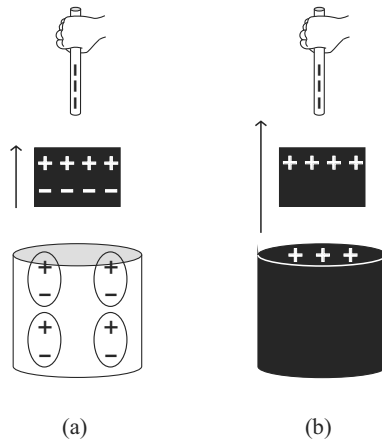


FIG. 8.7 : (a) Un morceau de papier polarisé, initialement posé sur une surface isolante, est attiré par une paille frottée. (b) Un morceau de papier électrisé, initialement posé sur une surface conductrice, est attiré par une paille frottée. La taille des flèches indique la force exercée, en supposant que les distances sont identiques dans les deux cas.

situation la plus courante dans laquelle on observe des attractions électrostatiques. Autrement dit, normalement, lorsqu'une substance solide ou liquide est sensiblement attirée par un corps électrisé, cette substance est un conducteur. Si la substance était un isolant, la force nette exercée sur elle serait généralement faible, ce qui rendrait difficile l'observation de son mouvement. De plus, comme cette substance conductrice qui est attirée était auparavant soutenue par une autre substance conductrice (comme le sol, le corps humain, une table en bois, une feuille de papier ou une plaque métallique), elle aura une charge nette lorsqu'elle se déplacera vers le plastique frotté. Et la charge nette sur la substance conductrice légère dans cette situation aura un signe opposé à celui du corps électrisé qui l'attire.

Le générateur électrostatique de Kelvin, sous-section 7.12.1, est analogue aux expériences 7.32 à 7.34. La différence est qu'il utilise des gouttes d'eau au lieu de petits morceaux de papier.

Ici, nous ne tenons pas compte des influences d'autres corps proches dans l'expérience de l'effet de l'ambre. De plus, nous ne tenons pas compte de ce qui se passerait s'il y avait une plaque conductrice ou isolante entre la paille frottée et les substances légères. Nous ne tenons pas non plus compte de l'influence de la forme du support sur la force nette exercée sur la substance légère.

Ces phénomènes peuvent ne pas se produire, ou seulement avec une très faible intensité, si la paille frottée devient humide à cause de la transpiration de notre main ou de l'humidité de l'air ambiant. Comme l'eau douce se comporte comme un conducteur dans ces expériences, elle peut aider à décharger la paille frottée. Cette mise à la terre peut se faire soit par notre main, soit par l'air ambiant.

Après être entrée en contact avec la paille électrisée, en raison du mécanisme ACR,

la petite substance conductrice peut recevoir une charge du même signe que la paille. Après ce contact, la substance tombera au sol soit en raison de son poids, soit en raison de la répulsion électrique exercée par la paille. Ce mécanisme ne fonctionne pas aussi bien lorsqu'une substance isolante entre en contact avec la paille frottée. Par conséquent, après avoir été attirée et être entrée en contact avec la paille frottée, la substance isolante tombe au sol après un certain temps en raison de son poids et d'une perte d'électrisation qui se produit naturellement dans la paille avec le temps. Cette perte d'électrisation est due à la faible conductivité de l'air sec.

Comme nous pouvons le constater, un grand nombre de phénomènes et de processus se produisent dans l'expérience de l'effet de l'ambre, qui est analogue à l'expérience 2.1. Nous comprenons donc pourquoi il a fallu tant de temps pour comprendre clairement ce qui se passait ici. De plus, nous ne faisons que décrire plus en détail les nombreux processus microscopiques qui se produisent, mais nous n'expliquons pas l'expérience. Après tout, nous n'avons pas expliqué pourquoi les charges de signe opposé s'attirent, ni les mécanismes responsables de l'électrisation par frottement, ni les raisons pour lesquelles certains corps se comportent comme des conducteurs tandis que d'autres se comportent comme des isolants, ni l'origine des forces non électrostatiques qui maintiennent les charges fixées à la surface des conducteurs et des isolants électrisés ou polarisés; nous n'avons pas non plus expliqué pourquoi la force dépend de la distance, ni la série triboélectrique, ni les raisons pour lesquelles un certain corps *A* devient chargé négativement lorsqu'il est frotté contre un certain corps *B* (au lieu de devenir chargé positivement ou de rester électriquement neutre), etc.

Quoi qu'il en soit, nous avons aujourd'hui une connaissance raisonnable de ce qui se passe dans de nombreux phénomènes électriques. De plus, nous pouvons contrôler de nombreux mécanismes impliqués dans ces processus. Cela représente certainement un grand progrès dans notre maîtrise de la nature et dans notre compréhension de nombreux phénomènes physiques.

L'histoire de l'électricité est relativement courte par rapport à celle de l'astronomie, de la géométrie ou de la mécanique. C'est pourquoi nous avons encore accès aux écrits de certains des principaux scientifiques responsables de la découverte des phénomènes électriques les plus importants. Il est fascinant de reproduire leurs expériences avec des matériaux simples et peu coûteux. Il est également très intéressant de lire les comptes rendus de leurs travaux et de voir comment ils ont réagi à leurs découvertes, ce qui les a guidés, etc.

Avec ce livre, nous espérons aider d'autres personnes à suivre les chemins fascinants de la nature, tels qu'ils ont été découverts par certains des plus grands scientifiques au début de l'histoire de l'électricité.

Annexe A

Définitions

Nous présentons ici les définitions de certaines expressions utilisées dans cet ouvrage.

Ambre—Résine fossile dure, translucide, de couleur jaunâtre ou brunâtre.

Balle de céréale—L'ensemble des glumes ou glumelles qui renferment le grain.

Boyau de chat—Corde résistante, généralement fabriquée à partir d'intestins de mouton.

Copal—Résine récente ou fossile provenant de divers arbres tropicaux.

Gomme laque—Substance résineuse sécrétée par certaines espèces de cochenilles et principalement utilisée sous forme de vernis.

Jais—Charbon compact, noir velouté, qui se polit bien.

Nylon—L'un des nombreux matériaux polyamides synthétiques élastiques et résistants qui sont transformés en fibres, filaments, poils ou feuilles et utilisés notamment dans les textiles et les plastiques.

Polyamide—Polymère contenant des groupes amides répétés, un amide polymère. Le nylon est un matériau polyamide synthétique.

Polyester—Le polyester est une catégorie de polymères qui contiennent le groupe fonctionnel ester dans leur chaîne principale.

Résine—Toute substance organique naturelle solide ou semi-solide, amorphe, fusible et inflammable, généralement transparente ou translucide, de couleur jaunâtre à brune, formée notamment dans les sécrétions végétales.

Verre flint—Verre lourd et brillant contenant de l'oxyde de plomb.

Annexe B

Stephen Gray et la découverte de la conduction électrique

L'un des aspects les plus importants de toute la science de l'électricité est le fait qu'il existe deux types de corps aux propriétés très distinctes, les « isolants » et les « conducteurs ». Dans le cas des isolants, les charges générées par frottement restent dans la zone frottée et ne se déplacent pas le long du matériau. Un isolant frotté ne se décharge pas au contact du sol. Dans les conducteurs, en revanche, les charges générées par le frottement se propagent immédiatement sur toute la surface du conducteur. Si un conducteur chargé entre en contact avec le sol, il se décharge immédiatement, perdant sa charge électrique au profit de la Terre.

La découverte de ces deux types de corps et de leurs principales propriétés n'est venue que très tard dans l'histoire de l'électricité. Stephen Gray (1666–1736) a fait cette grande découverte en 1729, publiant un ouvrage fondamental sur le sujet en 1731.¹ Nous présentons ici quelques aspects de sa vie et de son œuvre.² Il a publié certains des articles les plus importants dans l'histoire des débuts de l'électricité.³

Gray est né en 1666 à Canterbury, en Angleterre. Il n'existe aucun portrait connu de Gray. Son père et son frère étaient teinturiers de profession. Ils teignaient les tissus pendant leur fabrication. Gray lui-même travaillait également comme teinturier, comme l'a établi Heilbron.⁴ Il n'a jamais étudié à l'université. Il était un scientifique amateur, qui a principalement contribué à l'astronomie et à l'électricité. Il ne s'est probablement jamais marié. À l'âge de 53 ans, il a commencé à vivre comme pensionnaire à la Charterhouse, un foyer caritatif pour les capitaines de marine à la retraite et les garçons pauvres. Les personnes qui y vivaient menaient une vie simple, avec peu de confort, mais sans craindre la famine. Il y a vécu jusqu'à sa mort, à l'âge de 70 ans.

Il a peut-être étudié avec son ami, l'astronome royal John Flamsteed (1646–1719). En 1707, il a été amené à Cambridge par Roger Cotes (1682–1716). Gray a été élu

¹[Gra31a].

²[CM79], [Hei81c], [Hei99, pp. 242–249], [CC00] et [BC10].

³[Chi54], [Gra20], [Gra31a], [Gra31b], [Gra31c], [Gra31d], [Gra35a], [Gra35b], [Gra35c] et [Gra35d].

⁴[Hei81c].

membre de la Royal Society en 1732. Grâce à ses recherches sur l'électricité, Gray a été le premier lauréat de la médaille Copley de la Royal Society pour ses réalisations scientifiques.

Son intérêt pour l'électricité a été suscité par les articles de Francis Hauksbee (né vers 1666 et mort en 1713) publiés dans les *Philosophical Transactions* de 1704 à 1707. Hauksbee y décrivait des expériences menées avec un tube de verre frotté qui, en plus d'attirer de petites substances, émettait également de la lumière. En 1708, Gray envoya une lettre au secrétaire de la Royal Society, Hans Sloane (1660–1753), dans laquelle il décrivait plusieurs expériences sur l'électricité. Cette lettre ne fut publiée qu'en 1954.⁵ Dans cette lettre, il décrivait plusieurs expériences analogues à celles de Guericke, dans lesquelles une plume est attirée par un verre frotté, le touche, puis en est repoussée, comme dans l'expérience 4.4. Bien que Gray n'ait pas cité Guericke dans ses travaux, il connaissait peut-être ses expériences.⁶ En 1720, Gray publia un article décrivant de nouvelles expériences sur l'électricité.⁷ Dans cet ouvrage, il décrivait une sorte de pendule électrique et de nouvelles substances électriques. En d'autres termes, il découvrit de nouvelles substances qui attirent les corps légers lorsqu'elles sont frottées, ou qui sont attirées par le bois ou le corps humain lorsque ces nouvelles substances sont frottées, comme dans l'expérience 3.10.

B.1 Le générateur électrique de Gray

Ses principales découvertes ont été faites entre 1729 et 1736, alors qu'il était âgé de 63 à 70 ans. L'article principal décrivant sa découverte des conducteurs et des isolants a été publié en 1731.⁸ Jusqu'alors, personne n'avait réussi à faire en sorte que les métaux attirent les corps légers, même en les frottant, en les chauffant ou en les caressant. Ce fut l'une des découvertes les plus importantes de Gray : il apprit à communiquer la propriété électrique d'attirer les corps légers à une grande variété de substances que personne n'avait jusqu'alors réussi à électriser. Gray n'électrisait pas les métaux par friction. Mais il démontra que les métaux acquièrent la propriété d'attirer les corps légers lorsqu'ils sont connectés à un tube en verre flint frotté, ou simplement en approchant ce tube du métal.

Son article commence par les mots suivants :^{9,10}

En l'an 1729, j'ai communiqué au Dr Desaguliers et à quelques autres messieurs une découverte que j'avais récemment faite, montrant que la vertu électrique d'un tube de verre peut être transmise à d'autres corps, de manière à leur conférer la même propriété d'attirer et de repousser les corps légers que celle du tube lorsqu'il

⁵[Chi54].

⁶[Chi54, p. 38, Paragraph 6].

⁷[Gra20].

⁸[Gra31a].

⁹[Gra31a, pp. 18–19].

¹⁰In the year 1729 I communicated to Dr. *Desaguliers*, and some other Gentlemen, a Discovery I had then lately made, shewing that the Electric Vertue of a Glass Tube may be conveyed to any other Bodies, so as to give them the same Property of attracting and repelling light Bodies, as the Tube does, when excited by rubbing; that this attractive Vertue might be carried to Bodies that were many Feet distant from the Tube.

est excité par frottement ; que cette vertu attractive peut être transmise à des corps situés à plusieurs pieds de distance du tube.

Le tube de verre creux qu'il utilisa était en verre flint, c'est-à-dire un verre lourd et brillant contenant de l'oxyde de plomb. Il frota son tube à mains nues, comme il le mentionna dans son article de 1707-1708 :^{11,12}

Le tube de verre utilisé était à peu près de la même taille que celui utilisé par M. Hauksbee, mais au lieu de le froter avec du papier comme il le recommande, j'ai constaté que le froter à mains nues donnait de meilleurs résultats.

Il tenait également le tube de verre frotté dans sa main pendant les expériences. Comme le tube n'était pas déchargé au contact des mains, cela signifie qu'il agissait comme un très bon isolant, contrairement à la plupart des verres modernes que l'on trouve dans les foyers.

Il est normal que nos mains transpirent en raison de la chaleur dégagée pendant le processus de frottement. Le verre peut devenir humide pendant ce processus, perdant ainsi certaines de ses propriétés isolantes. Le verre flint de Gray était un tube cylindrique creux d'environ 1 mètre de long. Sa longueur a peut-être contribué à maintenir ses propriétés isolantes. Il l'a peut-être frotté uniquement à une extrémité, en le tenant par l'autre extrémité. Cela aurait permis de conserver une quantité raisonnable de verre sec entre ces deux zones, ce qui aurait donné un degré d'isolation raisonnable.

Le tube de verre de Gray n'était pas seulement un excellent isolant. D'après ce que nous verrons, il a réussi à transmettre une force d'attraction à de très longues cordes conductrices. Le verre touchait la corde ou était maintenu près d'une extrémité, l'autre extrémité de la corde attirant une feuille de laiton. Cela signifie qu'il a pu créer une forte polarisation de la corde grâce à la grande quantité de charge dans son tube de verre. Ce tube a pu accumuler une grande quantité de charges électriques pendant le processus de frottement.

Il a décrit le tube comme suit :^{13,14}

Avant de passer aux expériences, il peut être nécessaire de donner une description du tube : sa longueur est de trois pieds cinq pouces [1 m], et son diamètre [extérieur] est d'environ un pouce deux dixièmes [3 cm] : je donne les dimensions moyennes, le tube étant plus large à chaque extrémité qu'au milieu, l'alésage étant d'environ un pouce [2,5 cm]. J'ai fixé un bouchon en liège à chaque extrémité afin d'empêcher la poussière de pénétrer lorsque le tube n'était pas utilisé.

Cette dernière précaution a peut-être été motivée par les expériences menées par Hauksbee, qui ont montré que les contaminants présents à l'intérieur du tube pouvaient réduire son électricité.¹⁵

¹¹[Chi54, pp. 34,37].

¹²The Glass tube made use of was about the size of that made use of by Mr Hauksbee but insted of rubing it with Paper as he directs I found it to succeed better with me when Rubed with my bare hand only.

¹³[Gra31a, p. 20].

¹⁴Before I proceed to the Experiments, it may be necessary to give a Description of the Tube : Its Length is three Feet five Inches [1 m], and near one Inch two Tenths in [external] Diameter [3 cm] : I give the mean Dimensions, the Tube being larger at each End than in the Middle, the Bore about one Inch [2.5 cm]. To each End I fitted a Cork, to keep the Dust out when the Tube was not in use.

¹⁵[Hau08] et [Hei99, p. 245].

Ce tube de verre creux qu'il frottait avec ses mains était son générateur électrique standard.

B.2 La découverte de l'électrisation par la communication

Nous en arrivons maintenant à la grande découverte de Gray, faite en février 1729 (nos italiques)^{16,17}

La première expérience que j'ai faite consistait à voir si je pouvais trouver une différence dans son attraction lorsque le tube [frotté] était bouché aux deux extrémités par les bouchons, ou lorsqu'il était laissé ouvert, mais je n'ai pu percevoir aucune différence sensible ; cependant, en tenant une plume de duvet à l'opposé de l'extrémité supérieure du tube, j'ai constaté qu'elle allait vers le bouchon, attirée et repoussée par celui-ci, comme par le tube lorsqu'il avait été excité par le frottement. J'ai ensuite tenu la plume contre l'extrémité plate du bouchon, qui l'a attirée et repoussée plusieurs fois de suite, *ce qui m'a beaucoup surpris et m'a amené à conclure qu'il y avait certainement une force d'attraction communiquée au bouchon par le tube excité.*

En d'autres termes, il n'avait frotté que le tube en verre, mais pas le bouchon. En revanche, il observa que la plume de duvet était attirée et repoussée par le bouchon qui était en contact avec le tube. Il fit un test et conclut que c'était bien le cas, car le bouchon attirait non seulement par sa surface latérale, qui était en contact avec le tube, mais aussi par sa face plane qui n'avait pas été frottée et qui n'était pas en contact direct avec le verre.

Comme Gray n'a fourni aucun dessin dans ses articles, il n'est pas facile de savoir exactement quel type d'expérience il a réalisé ici. Nous voyons trois possibilités.

(a) Il a peut-être tenu la plume de duvet dans sa main, celle-ci servant d'isolant. Il aurait alors observé la plume se courber et être attirée et repoussée par le bouchon, touchant alternativement le bouchon et sa main. Les fibres de la plume auraient agi comme un conducteur, se chargeant grâce au mécanisme ACR, puis se déchargeant lorsqu'elles touchaient sa main, ce processus se répétant plusieurs fois, figure B.1.

(b) La plume de duvet était peut-être attachée à un fil de soie, un isolant, se déplaçant comme un pendule oscillant. Autrement dit, elle se chargeait lorsqu'elle était en contact avec le bouchon et se déchargeait lorsqu'elle était en contact avec un conducteur proche, tel que sa main, un objet en bois ou un mur, figure B.2. Le verbe qu'il a utilisé dans sa description était « tenir ». Cela suggère qu'il tenait la plume avec sa main. Comme la plume a été attirée et repoussée plusieurs fois, cela suggère qu'elle

¹⁶[Gra31a, p. 20].

¹⁷The first Experiment I made, was to see if I could find any Difference in its Attraction, when the [rubbed] Tube was stopped at both Ends by the Corks, or when left open, but could perceive no sensible Difference ; but upon holding a Down-Feather over against the upper End of the Tube, I found that it would go to the Cork, being attracted and repelled by it, as by the Tube when it had been excited by rubbing. I then held the Feather over against the flat End of the Cork, which attracted and repelled many Times together ; *at which I was much surprized, and concluded that there was certainly an attractive Vertue communicated to the Cork by the excited Tube.*

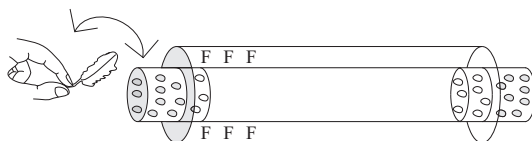


FIG. B.1 : Première hypothèse sur la manière dont Gray aurait pu faire son observation cruciale.

se trouvait entre le liège et un conducteur (peut-être la main de Gray, un mur ou un autre objet). Lorsque le liège a été électrisé ou polarisé par le tube de verre frotté, il a attiré la plume. Après avoir touché le liège, la plume acquérait une certaine charge et était repoussée par le liège en raison du mécanisme ACR. La plume pouvait alors se décharger sur un autre conducteur à proximité. Après cette décharge, elle était à nouveau attirée par le liège électrisé ou polarisé, et ce processus pouvait se répéter plusieurs fois. C'est-à-dire quelque chose d'analogue à ce que nous avons vu dans l'expérience 4.15. Comme nous l'avons vu dans la section 4.6, en 1720, Gray lui-même avait utilisé un pendule électrique avec une plume attachée à un fil de soie.¹⁸

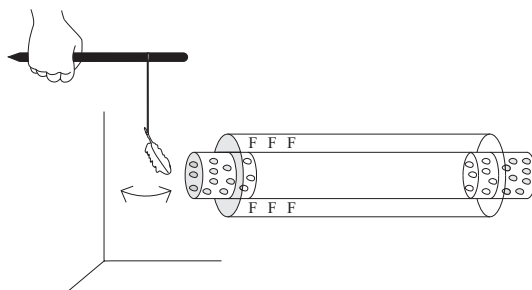


FIG. B.2 : Deuxième façon possible dont Gray aurait pu réaliser son observation cruciale. Dans ce cas, la plume de duvet serait attachée à un fil de soie, un isolant.

(c) La troisième possibilité est que l'expérience actuelle était analogue à celle réalisée par Gray en 1708 et que nous avons décrite dans la section 4.2. Autrement dit, la plume de duvet aurait pu être lâchée dans l'air au-dessus du bouchon. Elle aurait alors été attirée par le bouchon à l'extrémité du verre frotté, puis électrisée par le mécanisme ACR, puis repoussée par le bouchon. Si la plume s'était approchée d'un autre conducteur situé à proximité (comme la main de Gray, un mur ou un autre conducteur), elle aurait été attirée par ce conducteur. Elle se serait déchargée au contact de ce conducteur, puis aurait été à nouveau attirée par le bouchon électrisé ou polarisé. Ce processus aurait pu se répéter plusieurs fois, figure B.3.

Cette troisième possibilité nous semble la plus probable. Le verbe « tenir » (“held”) avait déjà été utilisé par Gray dans sa deuxième expérience de 1708 décrite dans la section 4.1, p. 60. Dans ce cas, après que la plume de duvet ait été lâchée des doigts et attirée par le tube de verre frotté, si elle était maintenue à une courte distance d'un

¹⁸[Gra20].

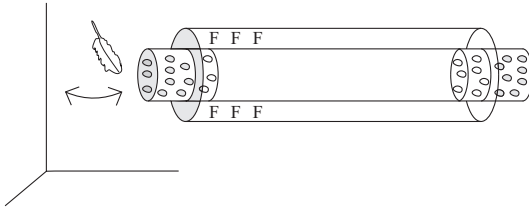


FIG. B.3 : Troisième façon possible dont Gray aurait pu réaliser son observation cruciale. La plume de duvet oscillerait dans l'air entre le bouchon et un autre corps proche.

objet, elle oscillerait entre cet objet et le verre. Nous pensons que cette expérience de 1729 était analogue à celle décrite dans la figure 4.11. La différence est que maintenant, la plume oscillait entre le bouchon et un corps proche, le bouchon étant relié au tube de verre frotté, bien que le bouchon lui-même n'ait pas été frotté.

On ne sait pas non plus si le tube de verre frotté était vertical ou horizontal. Même pour un tube horizontal, on peut parler de son « extrémité supérieure » pour désigner la partie proche de l'extrémité frottée qui était la plus éloignée de la surface de la Terre, tandis que l'extrémité inférieure serait la partie proche de l'extrémité frottée qui était la plus proche de la surface de la Terre. Il se peut également que dans une partie de l'expérience, le tube ait été vertical, tandis que dans une autre partie, il ait été horizontal.

Bien qu'il s'agisse d'une découverte fortuite (selon les propres termes de Gray) « qui m'a beaucoup surprise » (“at which I was much surprized”), Gray s'attendait en réalité à ce que l'électricité puisse être transmise à d'autres corps. Il avait déjà mené des expériences au cours desquelles il avait observé que de la lumière était émise par des corps frottés et se dirigeait vers d'autres corps qui n'avaient pas été frottés, dès que ces derniers étaient approchés des corps frottés. Juste avant de décrire l'expérience précédente avec la plume de duvet et le liège, Gray avait écrit ce qui suit dans son article de 1731 :^{19,20}

Je décidai alors de me procurer un grand tube de verre flint, afin de voir si je pouvais faire d'autres découvertes avec celui-ci, me souvenant d'un soupçon que j'avais eu quelques années auparavant, à savoir que si le tube communiquait de la lumière aux corps lorsqu'il était frotté dans l'obscurité, il pouvait peut-être en même temps leur communiquer de l'électricité, bien que je n'aie jamais essayé l'expérience jusqu'à présent, n'imaginant pas que le tube puisse avoir une influence aussi grande et merveilleuse, au point de les attirer avec une telle force, ou que l'attraction puisse s'exercer à des distances aussi prodigieuses, comme on le verra dans la suite de ce discours.

¹⁹[Gra31a, pp. 19–20].

²⁰I then resolved to procure me a large Flint-Glass Tube, to see if I could make any farther Discovery with it, having called to Mind a Suspicion which some Years ago I had, that as the Tube communicated a Light to Bodies, when it was rubbed in the Dark, whether it might not at the same Time communicate an Electricity to them, though I never till now tried the Experiment, not imagining the Tube could have so great and wonderful an Influence, as to cause them to attract with so much Force, or that the Attraction would be carried to such prodigious Distances, as will be found in the Sequel of this Discourse.

L'importance de cette découverte réside dans le fait que le liège se comporte comme un conducteur, comme nous l'avons vu dans les sous-sections 6.3.1 et 6.3.2. C'est pourquoi il n'est pas possible de le charger par friction en le tenant dans la main. En effet, toute charge qu'il aurait pu acquérir par friction serait immédiatement déchargée par notre corps. C'est pourquoi, jusqu'alors, personne n'avait réussi à faire en sorte que le liège, les métaux, etc. attirent des corps légers après avoir été frottés, comme c'était facilement le cas avec l'ambre ou le verre flint. C'est le détail de la plume de duvet attirée par le liège qui a attiré l'attention de Gray. Cette observation lui a indiqué qu'il pouvait d'une manière ou d'une autre transmettre la vertu électrique au liège, qui était classé comme un matériau non électrique. Ce fut la première découverte fondamentale de Gray dans cet article : communiquer l'électricité à un autre corps (comme le liège) sans le frotter.

L'interprétation moderne ou la description microscopique de la « vertu attractive » que Gray a réussi à transmettre au liège est qu'il s'est polarisé, comme dans l'expérience 7.9. Ceci est illustré dans la figure B.4.

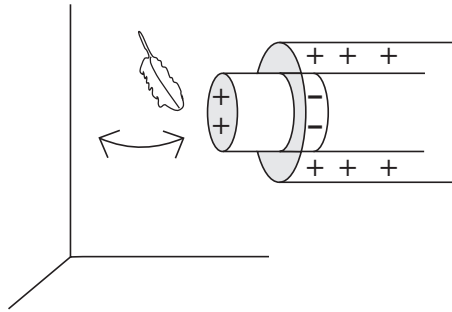


FIG. B.4 : Polarisation du liège conducteur due au frottement du verre. La plume de duvet conductrice a été attirée par les charges réparties sur la surface externe du liège.

En d'autres termes, le tube de verre isolant a été chargé par friction. Le bouchon conducteur fixé au verre frotté s'est polarisé. Sa surface interne a acquis une charge de signe opposé à celle du tube frotté. Sa surface externe a acquis une charge de même signe que celle du tube frotté. La plume de duvet conductrice située à proximité a été attirée par ces charges réparties sur la surface externe du bouchon.

B.3 L'exploration de la découverte et la révélation de l'électricité cachée des métaux

Après cette découverte fortuite, Gray a poursuivi ses expériences.²¹ Il a commencé à déterminer systématiquement à quels corps il pouvait communiquer « l'électricité » ou la « vertu attractive ». Il voulait également savoir jusqu'où il pouvait transmettre ces propriétés. Il a fixé une boule d'ivoire de 3,3 cm de diamètre, percée d'un trou, à un bâton en bois de 10 cm de long. L'autre extrémité de ce bâton était fixée dans le

²¹[Gra31a].

bouchon relié au tube de verre. Lorsqu'il a frotté le tube, il a observé que la boule attirait et repoussait la plume de duvet plus vigoureusement que le bouchon, figure B.5. Il a augmenté la longueur du bâton à 20 cm, puis à 60 cm, et l'attraction est restée. Il a remplacé le bâton en bois par des fils de fer et de laiton, observant les mêmes effets.

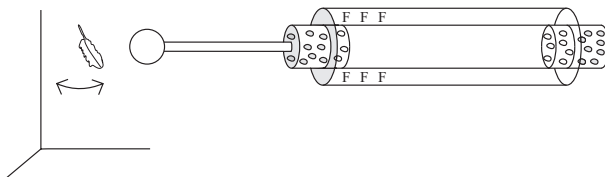


FIG. B.5 : Le début des expériences systématiques de Gray.

Il a augmenté la longueur des fils jusqu'à 90 cm, mais a alors rencontré de nombreuses vibrations. Celles-ci étaient causées par le frottement du tube, ce qui rendait difficile l'observation des attractions. Il a alors suspendu la boule à une corde à emballer suspendue à une boucle sur le tube. La corde à emballer était une corde solide utilisée pour emballer des colis.²² Lorsqu'il frottait le tube, la boule attirait et repoussait une feuille de laiton placée en dessous. Il en allait de même pour une boule de liège et une boule de fer de 570 g reliée à la corde, figure B.6 (a). La figure B.6 (b) est une représentation qualitative des charges sur le tube isolant, ainsi que de la polarisation de la corde et de la boule qui y est reliée. La corde et la boule sont des conducteurs.

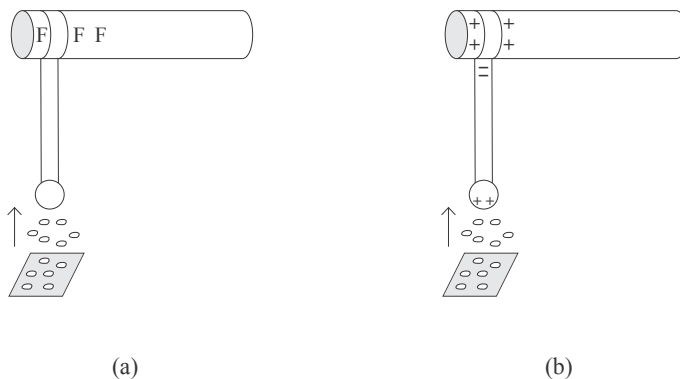


FIG. B.6 : (a) Quand Gray a frotté le tube de verre, il a observé l'attraction de la feuille de laiton légère par des corps fixés à l'extrémité inférieure d'une corde reliée au tube. Le corps attractif pouvait même être métallique. (b) Représentation qualitative des charges sur le verre, ainsi que la polarisation de la corde et de la boule reliée.

En suivant ces procédures, il a pu transmettre l'électricité du tube frotté à plusieurs objets reliés à celui-ci par des fils ou des cordes, tels que des pièces de monnaie, une pelle à feu, une bouilloire en cuivre vide ou remplie d'eau, un pot en argent d'une

²²[Hei99, p. 246, Note].

pinte, etc. Selon ses propres termes, tous ces objets^{23,24}

étaient fortement électrisés, attirant la feuille de laiton à plusieurs centimètres de hauteur.

Quelqu'un avait enfin réussi à faire en sorte que les métaux attirent des objets légers. Personne n'avait été capable d'obtenir cet effet en 2 000 ans depuis la découverte de l'électricité! Comme l'a dit Heilbron,^{25,26}

[...] et Gray réussit enfin à réveiller leur électricité cachée.

B.4 Gray découvre les conducteurs et les isolants

Il a poursuivi ses recherches et, grâce à cette technique, a électrisé (ou plutôt a polarisé) du silex, de la magnétite, plusieurs substances végétales, etc. La feuille de laiton pouvait être attirée jusqu'à une hauteur de 10 cm. Après ces expériences, il a travaillé à nouveau avec des baguettes horizontales fixées au tube de verre. Il a placé des cannes à pêche de 80 cm de long dans le tube. Ces cannes transmettaient également l'électricité, qu'elles fussent creuses ou pleines. À l'aide de bâtons et de cannes à pêche, munis d'une boule de liège à leur extrémité, il a pu observer l'effet même à une distance de 5,5 m. En mai 1729, il a poursuivi ses expériences et a réussi avec un poteau en bois de 7,3 m de long relié au tube de verre. Même à cette grande distance, une boule de liège fixée à l'extrémité du poteau attirait une feuille de laiton lorsque le tube était frotté. Il a prolongé cette expérience jusqu'à 9,7 m, tube compris. Mais une fois de plus, les vibrations provoquées par le frottement du tube ont perturbé l'expérience. Il a donc décidé d'utiliser une boule de liège ou d'ivoire reliée à l'extrémité inférieure d'une corde à emballer attachée au tube. Lorsque Gray frottait le tube, il pouvait faire en sorte que la boule attire la feuille de laiton même avec une corde de 8 m de long, Gray se tenant sur le balcon. Il a ensuite combiné une longue canne horizontale en bois attachée au tube avec un fil vertical relié à l'autre extrémité de la canne, avec une boule d'ivoire à l'extrémité inférieure du fil, comme une énorme canne à pêche. Au départ, il a travaillé avec une canne en bois de 5,5 m de long et un fil de 10,3 m de long. Lorsqu'il frottait le tube en verre, il observait la boule d'ivoire attirer une feuille de laiton située en dessous.

Il a ensuite essayé d'augmenter la longueur horizontale en utilisant uniquement de la corde. Pour ce faire, il a fait une boucle à chaque extrémité d'une corde verticale, dont l'extrémité supérieure était suspendue à un clou enfoncé dans une poutre. La deuxième corde passait par la boucle inférieure de la corde verticale et était attachée au tube de verre. L'autre extrémité de cette deuxième corde était attachée à une boule en ivoire. Si l'on suivait ce deuxième corde depuis la boule d'ivoire jusqu'au tube de verre, elle serait verticale entre la boule et l'extrémité inférieure de la première corde, et horizontale entre cette boucle et le tube. Sous la boule d'ivoire, il plaçait une feuille

²³ [Gra31a, p. 22].

²⁴ were strongly Electrical, attracting the Leaf-Brass to the Height of several Inches.

²⁵ [Hei99, p. 246].

²⁶ [...] and so Gray succeeded at last in awakening their hidden electricity.

de laiton. Dans ce cas, lorsqu'il frottait le tube de verre, Gray ne pouvait observer la moindre attraction de la feuille de laiton par la boule d'ivoire, figure B.7 (a).

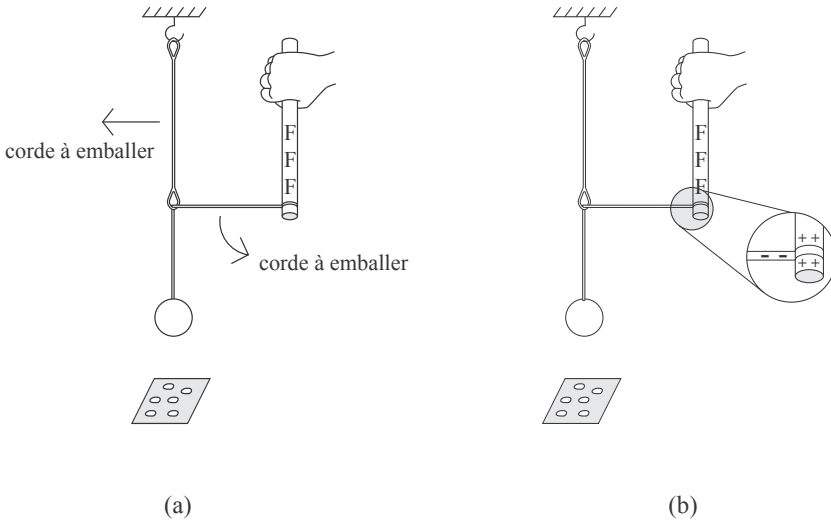


FIG. B.7 : (a) Lorsque le tube de verre est frotté, la boule en ivoire n'attire pas la feuille de laiton. Dans cette situation, la corde à emballer reliée au tube et à la boule est également reliée à une autre corde fixée au plafond. (b) Représentation qualitative des charges dans le cas (a).

Il a ensuite noté :^{27,28}

J'en ai conclu que lorsque la vertu électrique provenant [du tube de verre frotté] atteignait la boucle suspendue à la poutre, elle remontait jusqu'à la poutre, de sorte qu'aucune, ou très peu, ne descendait jusqu'à la boule, ce qui a été vérifié par la suite, comme le montreront les expériences mentionnées ci-après.

Nous présentons maintenant l'interprétation moderne de cette expérience. Le tube de verre frotté polarise initialement la corde à emballer conductrice. Mais dans ce cas, la corde connectée au tube est également connectée à la Terre par une autre corde conductrice. Cette dernière corde relie à la Terre la corde connectée au verre, de manière analogue à ce qui a été observé dans la figure 7.30. Autrement dit, l'extrémité de la corde en contact avec le verre acquiert une charge de signe opposé à celle du verre. Les autres charges qui se trouvaient à l'extrémité de la boule dans la figure B.6 (b) sont désormais réparties sur la surface de la Terre en raison de la mise à la terre. La figure B.7 (b) présente une description qualitative de cette expérience en termes de charges réparties sur le verre et la corde. Dans ce cas, il n'y a pas de charge nette dans

²⁷[Gra31a, p. 25].

²⁸Upon this I concluded, that when the Electrick Vertue came [from the rubbed glass tube] to the Loop that was suspended on the Beam, it went up the same to the Beam; so that none, or very little of it at least, came down to the Ball, which was afterwards verified, as will appear by the Experiments that will be mentioned hereafter.

la boule et celle-ci n'est même pas polarisée. Pour ces raisons, la boule n'attire pas les feuilles métalliques situées en dessous.

En juillet 1729, Gray décida de montrer ces expériences à son ami Granville Wheeler (1701–1770). Gray disposait d'un tube en verre solide de 28 cm de long et de 2 cm de diamètre. Ils attachèrent la corde à emballer au tube, avec une boule à l'extrémité inférieure de la corde. Sous la boule, ils placèrent la feuille de laiton. Depuis une fenêtre, ils pouvaient faire en sorte que la boule attire la feuille de laiton en frottant le tube de verre avec des cordes de 4,9 à 10,4 m de long.

Gray poursuivit sa description des expériences, puis présenta sa plus grande découverte :^{29,30}

Comme nous n'avions pas de plus hauts sommets ici, M. *Wheeler* souhaitait essayer de voir si nous pouvions transporter la vertu électrique à l'horizontale. Je lui ai alors parlé de la tentative que j'avais faite dans ce but, mais sans succès, en lui expliquant la méthode et les matériaux utilisés, comme mentionné ci-dessus. Il a alors proposé d'utiliser un fil de soie pour soutenir la ligne [de communication] par laquelle la vertu électrique devait passer. Je lui ai dit que cela pourrait mieux fonctionner en raison de sa finesse [c'est-à-dire que Gray pensait que cela pourrait mieux fonctionner que dans son expérience initiale en raison de la faible épaisseur du fil de soie par rapport à l'épaisseur plus importante de la corde à emballer] ; il y aurait ainsi moins de vertu [électrique] transportée depuis la ligne de communication, ce qui, combiné à la méthode appropriée imaginée par M. *Wheeler*, aux grands efforts qu'il a lui-même déployés et à l'aide de ses serviteurs, nous a permis de réussir bien au-delà de nos attentes.

La première expérience a été réalisée dans la galerie matée le 2 juillet 1729, vers dix heures du matin. À environ quatre pieds [1,2 m] de l'extrémité de la galerie, il y avait une ligne transversale qui était fixée par ses extrémités de chaque côté de la galerie par deux clous ; la partie centrale de la ligne était en soie, le reste à chaque extrémité en corde à emballer ; ensuite, la ligne à laquelle était suspendue la boule d'ivoire, et par laquelle la vertu électrique devait lui être transmise depuis le tube, d'une longueur de quatre-vingts pieds et demi [24,5 m], était posée sur la ligne transversale en soie, de sorte que la boule pendait à environ neuf pieds [2,7 m]

²⁹ [Gra31a, pp. 26–27].

³⁰ As we had no greater Hights here, Mr. *Wheeler* was desirous to try whether we could not carry the Electrick Vertue horizontally. I then told him of the Attempt I had made with that Design, but without success, telling him the Method and Materials made use of, as mentioned above. He then proposed a Silk Line to support the Line [of communication], by which the Electrick Vertue was to pass. I told him it might do better upon the Account of its Smallness [that is, Gray believed this could work better than in his original experiment due to the small thickness of the silk thread in comparison with the greater thickness of the packthread] ; so that there would be less [electric] Vertue carried from the Line of Communication, with which, together with the apt Method Mr. *Wheeler* contrived, and with the great Pains he took himself, and the Assistance of his Servants, we succeeded far beyond our Expectation.

The first Experiment was made in the matted Gallery *July 2, 1729*, about Ten in the Morning. About four Feet [1.2 m] from the End of the Gallery there was a cross Line that was fixed by its Ends to each Side of the Gallery by two Nails; the middle Part of the Line was silk, the rest at each End Packthread; then the Line to which the Ivory Ball was hung, and by which the Electrick Vertue was to be conveyed to it from the Tube, being eighty Feet and a half [24.5 m] in Length, was laid on the cross Silk Line, so as that the Ball hung about nine Feet [2.7 m] below it : Then the other End of the Line [of communication] was by a Loop suspended on the Glass Cane, and the Leaf-Brass held under the Ball on a Piece of white Paper; when the Tube being rubbed, the Ball attracted the Leaf-Brass, and kept it suspended on it for some Time.

en dessous ; Ensuite, l'autre extrémité de la ligne [de communication] était suspendue par une boule à la canne de verre, et la feuille de laiton était maintenue sous la boule sur un morceau de papier blanc ; lorsque le tube était frotté, la boule attirait la feuille de laiton et la maintenait suspendue pendant un certain temps.

Une représentation de cette expérience est présentée dans la figure B.8 (a). Un fil est relié à un tube en verre et à une boule en ivoire à l'autre extrémité. Sous la boule se trouvent des feuilles de laiton. Ce fil comporte une partie horizontale et une partie verticale. À la jonction de ces deux parties, il est soutenu au-dessus d'un fil de soie tendu. Lorsque Gray a frotté le verre, il a observé que la boule attirait la feuille de laiton située en dessous. Cette attraction ne s'est pas produite dans la situation illustrée à la figure B.7. Dans cette dernière situation, la corde reliée au verre était suspendue à une autre corde fixée au plafond.

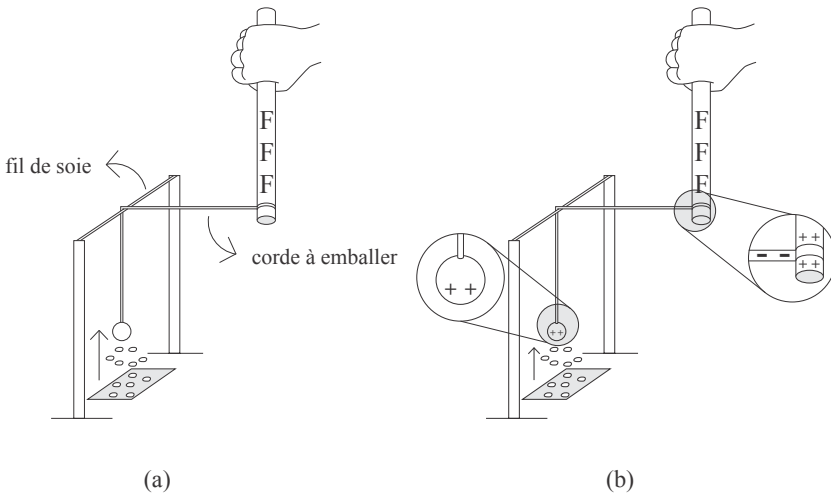


FIG. B.8 : (a) Gray a observé une attraction sur la feuille de laiton lorsqu'il a frotté le tube en verre. Dans cette situation, le fil attaché au tube en verre frotté était soutenu par un fil de soie. (b) Représentation qualitative des charges dans le cas (a).

La figure B.8 (b) présente une représentation qualitative des charges dans cette expérience. Dans ce cas, la corde à emballer est soutenue par un isolant, à savoir le fil de soie. Il n'y a pas de mise à terre. La situation est similaire à celle de la figure B.6 (b).

Nous avons ici la découverte fondamentale des conducteurs et des isolants. Les conducteurs sont le liège, la boule d'ivoire, le bois, la corde à emballer, les fils métalliques, etc. L'isolant est le fil de soie. Gray pouvait communiquer la vertu électrique aux conducteurs par contact avec un tube de verre frotté. Le fil de soie, en revanche, ne permettait pas le passage et la dissipation de la vertu électrique vers la terre. Dans cet article, Gray décrit un autre isolant, à savoir les lignes de pêche en crin de cheval.³¹ Dans d'autres articles de la même année, Gray mentionne d'autres isolants, à savoir

³¹[Gra31a, p. 36].

un bloc de résine et de verre chauffé.³² Il avait l'habitude de fabriquer des blocs de résine afin de soutenir les corps auxquels il souhaitait communiquer l'effluve électrique. Dans un article de 1735, il décrivait également des blocs de cire d'abeille, de soufre et de gomme laque.³³ Il utilisait tous ces matériaux comme isolants ou, selon ses propres termes, comme « corps électriques ».

Avant de poursuivre ces citations, il est important de rappeler le problème des anciennes et nouvelles nomenclatures abordé dans la section 8.1. En effet, les substances que Gilbert classait comme « électriques » sont aujourd'hui appelées « isolants ». Les substances qui étaient classées comme « non électriques » sont désormais appelées « conducteurs ».

Une représentation de cette expérience apparaît dans la figure B.9.³⁴



FIG. B.9 : Gray frotte son tube de verre flint d'un mètre de long à mains nues. Une corde à emballer reliée au tube est soutenue par un fil de soie. Une boule d'ivoire reliée à l'autre extrémité de la corde attire la feuille de laiton située en dessous.

Cette illustration montre Gray et son ami Wheler. Gray tient et frotte son tube de verre d'un mètre de long. Une corde à emballer est attachée à l'autre extrémité du tube, à laquelle est suspendue une boule en ivoire. La boule est proche du sol, avec de petits morceaux de métal en dessous. La corde attachée au tube de verre est soutenue par d'autres lignes croisées. Lorsque ces lignes croisées sont conductrices, la boule n'attire pas les morceaux de métal. En revanche, lorsque ces lignes croisées sont faites d'un matériau isolant comme la soie, la boule attire les morceaux de métal situés en dessous lorsque Gray frotte le tube de verre.

Une ancienne représentation de cette expérience cruciale menée par Gray est reproduite dans la figure B.10.³⁵

Une représentation intéressante de l'expérience de Gray apparaît dans l'ouvrage de Doppelmayer, figure B.11.³⁶

³²[Gra31b, p. 228] et [Gra31d, pp. 399 et 406].

³³[Gra35a, pp. 18 et 20].

³⁴[Fig67, vol. 1, figure 227, p. 441], [Fig85, p. 321], [Bor d] et [FM91, p. 88].

³⁵[Nol53].

³⁶[Dop74].

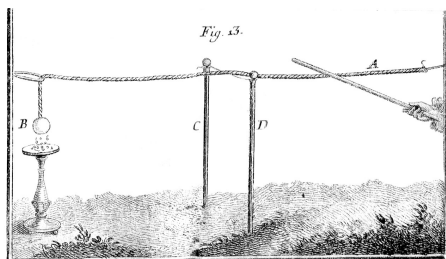


FIG. B.10 : Une boule d'ivoire attire une feuille de laiton lorsqu'un tube de verre frotté touche un fil horizontal, ou lorsque le tube est approché de celui-ci, à condition que le fil soit soutenu par des fils de soie.

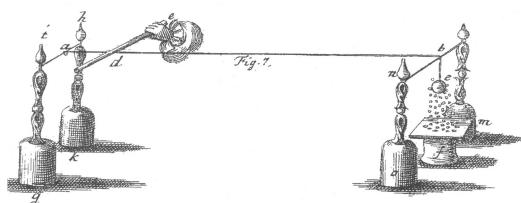


FIG. B.11 : Un tube de verre frotté touche une corde horizontale et la boule attire les corps légers. La corde est soutenue par des cordes isolantes.

Il s'agit de la deuxième découverte fondamentale décrite par Gray dans cet article, à savoir l'existence des conducteurs et des isolants.

B.5 La découverte que ce qui fait qu'un corps se comporte comme un conducteur ou comme un isolant dépend de ses propriétés intrinsèques

Après ces expériences, Gray et Wheler ont réussi à transmettre la vertu électrique sur une distance de 45 m à l'horizontale en effectuant des virages dans la ligne de transport, c'est-à-dire la corde à emballer. Ils ont ensuite atteint 34 m le long d'une ligne horizontale droite, ainsi que 4 m à la verticale. Un autre jour, ils ont atteint 89 m avec un fil horizontal effectuant quelques virages, toujours soutenu par des fils de soie. Lorsqu'ils ont essayé d'augmenter encore cette longueur totale, la ligne de soie s'est rompue. Elle n'a pas pu supporter le poids de la corde à emballer et les vibrations provoquées par le frottement du tube de verre.

Puis est arrivée la troisième découverte fondamentale de Gray, décrite dans cet article (nos italiques) :^{37,38}

³⁷[Gra31a, pp. 28–29].

³⁸Upon this, having brought with me both Brass and Iron Wire, instead of the Silk we put up small Iron

Sur ce, ayant apporté avec moi du fil de laiton et du fil de fer, nous avons remplacé la soie par du petit fil de fer, mais celui-ci était trop faible pour supporter le poids de la ligne [de communication]. Nous avons alors pris du fil de laiton d'une taille [épaisseur] légèrement supérieure à celle du fil de fer. Celui-ci a soutenu notre ligne de communication; mais bien que le tube [en verre] ait été bien frotté, il n'y avait pas le moindre mouvement ou attraction [de la feuille de laiton] donné par la balle, ni avec le grand tube [en verre de 1 m de long], que nous avons utilisé lorsque nous avons constaté que la petite canne solide [en verre de 28 cm de long] était inefficace : *Nous étions désormais convaincus que le succès que nous avons obtenu auparavant dépendait du fait que les lignes qui soutenaient la ligne de communication étaient en soie, et non du fait qu'elles étaient petites [fines], comme je l'avais imaginé avant l'essai*; le même effet s'est produit ici que lorsque la ligne qui doit transmettre la vertu électrique est soutenue par de la corde à emballer; à savoir, lorsque les effluves [électriques] atteignent le fil ou la corde qui soutient la ligne [de communication], ils passent à travers eux vers le bois auquel chaque extrémité est fixée, et ne progressent donc pas plus loin dans la ligne qui doit les transporter vers la boule d'ivoire.

Gray avait déjà découvert comment communiquer la vertu électrique au bois, aux métaux et à plusieurs autres substances. Il avait également découvert qu'un fil de soie empêchait la perte d'électricité à travers celui-ci. Cependant, il croyait initialement que cette propriété isolante était due à la faible épaisseur du fil de soie, par rapport à l'épaisseur plus importante d'une corde à emballer. Avec l'expérience actuelle, en revanche, il découvrit que deux lignes fines croisées de presque la même épaisseur, l'une en métal et l'autre en soie, présentaient un comportement complètement différent. Alors que le fil métallique (ou la corde à emballer) permettait le passage de la vertu électrique vers le sol, le fil de soie ne permettait pas le passage de l'électricité à travers lui. Cela signifiait que dans ses expériences, c'était essentiellement le type de matériau qui définissait ou caractérisait sa propriété. Contrairement à ce qu'il avait initialement pensé, la taille ou l'épaisseur des matériaux n'était pas si importante dans ses expériences pour déterminer s'ils se comporteraient comme un conducteur ou un isolant. Ce fut sa troisième découverte fondamentale.

Wire; but this was too weak to bear the Weight of the [communication] Line. We then took Brass Wire of a somewhat larger Size [thickness] than that of Iron. This supported our Line of Communication; but though the [glass] Tube was well rubbed, yet there was not the least Motion or Attraction [of the brass leaf] given by the Ball, neither with the great Tube [of glass 1 m long], which we made use of when we found the small solid Cane [of glass 28 cm long] to be ineffectual : *By which we were now convinced, that the Success we had before, depended upon the Lines that supported the Line of Communication, being Silk, and not upon their being small [thin], as before Trial I imagined it might be*; the same Effect happened here as it did when the Line that is to convey the Electrick Vertue is supported by Packthread; viz. that when the [electric] Effluvia come to the Wire or Packthread that supports the [communication] Line, it passes by them to the Timber, to which each End of them is fixed, and so goes no farther forward in the Line that is to carry it to the Ivory Ball.

B.6 La découverte que l'électrisation par la communication se produit à distance

Ils ont poursuivi leurs expériences, transmettant l'électricité jusqu'à 203 m, la corde à emballer effectuant huit allers-retours soutenu par des fils de soie. Une représentation de cette expérience apparaît dans les figures B.12 et B.13.³⁹

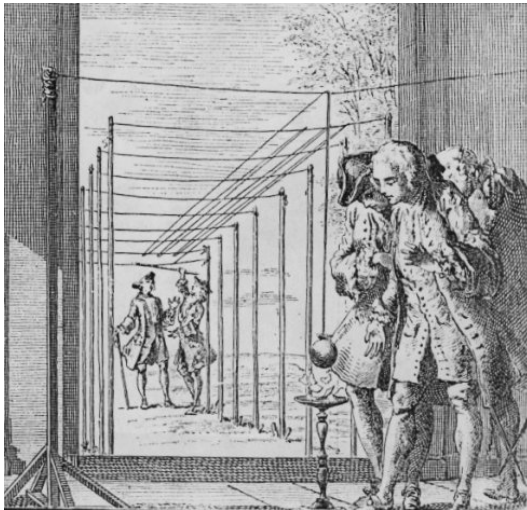


FIG. B.12 : Une représentation de l'expérience de Gray.

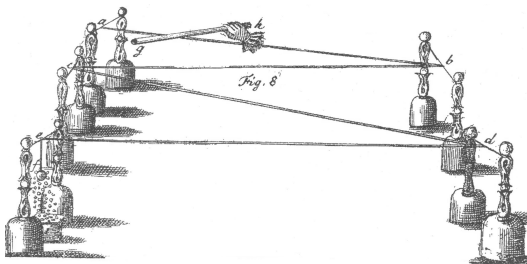


FIG. B.13 : Une boule attirant les corps légers lorsqu'elle est soutenue par des cordes isolantes. Le verre frotté s'approche de l'autre extrémité de la corde conductrice.

En ligne droite, ils ont prolongé l'expérience jusqu'à 198 m, puis jusqu'à 233 m. Dans les expériences suivantes, ils ont varié les corps suspendus à l'extrémité libre de la corde à emballer. Au lieu d'une boule en ivoire, ils ont utilisé une grande cartographie du monde de 8 m², un parapluie et une pierre magnétique à laquelle était accrochée une clé métallique par l'un de ses bras. Tous ces matériaux ont attiré la

³⁹[GS89], [BW12], et [Dop74].

feuille de laiton lorsqu'ils ont frotté le tube de verre. Après cette expérience, ils ont suspendu trois corps à différents endroits le long de la ligne de communication. Tous ont attiré simultanément la feuille de laiton lorsque le verre a été frotté. Ils ont également suspendu un poussin vivant par les pattes et ont observé que sa poitrine devenait fortement attractive.

À la fin de l'article, il a présenté d'autres expériences montrant qu'il pouvait transmettre la vertu électrique jusqu'à une distance de 270 m.

Ensuite est arrivée la quatrième découverte importante décrite par Gray dans cet article. Il a montré qu'il pouvait transmettre la vertu électrique le long de la ligne de communication simplement en approchant un tube de verre frotté de l'une de ses extrémités, sans contact entre le tube de verre et la corde à emballer :^{40,41}

Chez M. Godfrey, j'ai réalisé les expériences suivantes, démontrant que la vertu électrique peut être transmise depuis le tube sans toucher la ligne de communication, simplement en la tenant à proximité.

La première de ces expériences a été réalisée le 5 août 1729. [...]

J'ai pris un morceau de corde faite de cheveux [hair line], telle celle utilisée pour sécher le linge, d'environ onze pieds [3,3 m] de long, qui, grâce à une boucle à son extrémité supérieure, était suspendu à un clou enfoncé dans l'une des poutres du grenier, et qui avait à son extrémité inférieure un poids en plomb de quatorze livres [6,4 kg] accroché à un anneau de fer. J'ai ensuite placé la feuille de laiton sous le poids et frotté le tube, que je maintenais près de la corde sans la toucher. Le poids en plomb a attiré et repoussé la feuille de laiton plusieurs fois de suite, à une hauteur d'au moins trois, voire quatre pouces [10 cm]. Si le tube était tenu à trois ou quatre pieds [1,2 m] au-dessus du poids, il y avait une attraction ; mais s'il était tenu plus haut, de manière à être près de la poutre où le poids était suspendu par le fil, il n'y avait aucune attraction.

Une représentation de cette expérience est présentée dans la figure B.14 (a).

Notre compréhension actuelle de cette expérience est que le tube de verre frotté polarise électriquement le poids en plomb. La partie du poids la plus proche du verre s'électrise avec une charge de signe opposé à celui du verre, tandis que la partie la plus éloignée du plomb s'électrise avec une charge de même signe que celle du verre. La feuille de laiton est alors attirée essentiellement par la partie inférieure du plomb polarisé. Dans un certain sens, cela est analogue à l'expérience 7.9.

Une représentation qualitative des charges dans cette expérience apparaît dans la figure B.14 (b).

⁴⁰[Gra31a, pp. 33–34].

⁴¹At Mr. Godfrey's I made the following Experiments; showing that the Electric Vertue may be carried from the Tube, without touching the Line of Communication, by only being held near it.

The first of these Experiments was made the 5th of August, 1729. [...]

I took a Piece of a Hair-Line, such as Linnen-Cloaths are dried on, of about eleven Feet [3.3 m] in Length; which, by a Loop at the upper End of it, was suspended on a Nail, that was drove into one of the Rafters in the Garret, and had at its lower End a leaden Weight of fourteen Pounds [6.4 kg] hung to it by an Iron Ring : then the Leaf-Brass was laid under the Weight, and the Tube rubbed, and being held near the Line without touching it, the Lead-Weight attracted and repelled the Leaf-Brass for several times together, to the Height of at least three, if not four Inches [10 cm]. If the Tube was held three or four Feet [1.2 m] above the Weight, there would be an Attraction; but if it were held higher up, so as to be near the Rafter where the Weight was hung by the Hair-Line, there would be no Attraction.

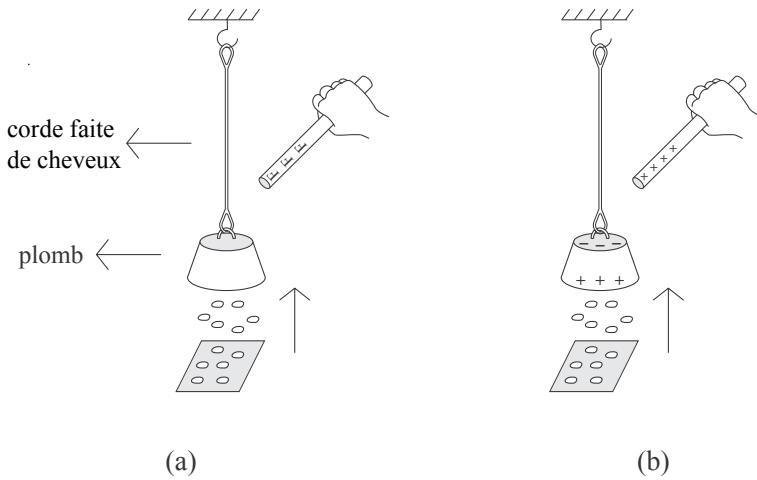


FIG. B.14 : (a) Gray a réussi à faire en sorte que le poids métallique attire les corps légers simplement en approchant le verre frotté près du poids, sans le toucher. (b) Représentation qualitative des charges dans le cas (a).

Gray a également utilisé des cordes faites de cheveux pour suspendre des corps dans d'autres expériences. On ne sait pas exactement de quoi ils étaient faits. Quoiqu'il en soit, ils fonctionnaient comme des isolants. Dans une autre expérience célèbre décrite dans cet article de 1731, Gray a suspendu un garçon de 21 kg en position horizontale,⁴²

à l'aide de deux cordes faites de cheveux, telles celles utilisées pour sécher le linge.

Il a ensuite approché un tube de verre frotté des pieds du garçon, sans les toucher, et a observé que le visage du garçon attirait une feuille de laiton placée sous lui.

Du Fay a répété l'expérience avec le garçon en 1733. Lorsqu'il a utilisé des cordes ordinaires, il n'a obtenu aucune attraction. Cependant, lorsqu'il remplaça les cordes ordinaires par des cordes de soie, il obtint les mêmes attractions que Gray.⁴³ Les cordes ordinaires sont généralement des conducteurs. Cela montre que les cheveux de Gray étaient des isolants, car ce n'est que lorsque nous utilisons des isolants que les expériences avec le garçon sont couronnées de succès.

Dans un article de 1735, Gray a réalisé des expériences similaires. Il a commencé par mentionner que^{44,45}

Comme je n'avais pas de cordes en soie suffisamment solides pour supporter le garçon, je l'ai fait se tenir debout sur certains des corps électriques.

⁴²by two hair-lines, such as cloaths are dried on.

⁴³[DF33d, pp. 250–251].

⁴⁴[Gra35a, p. 17].

⁴⁵As I had not any silk Lines by me strong enough to bear the Boy, I caused him to stand on some of the Electric Bodies.

Autrement dit, le garçon se tenait debout sur des isolants, comme on dit aujourd'hui. Dans la page suivante de cet article, Gray décrit une autre expérience qu'il a réalisée chez M. Wheler :⁴⁶

Peu après mon arrivée chez lui, M. Wheler s'est procuré des fils de soie suffisamment solides pour supporter le poids de son valet de chambre, un garçon bien costaud ; puis, après l'avoir suspendu à ces fils, [...].⁴⁷

Dans la suite de cet article, Gray décrit d'autres expériences dans lesquelles il transmet la vertu électrique à des conducteurs simplement en approchant le tube de verre frotté près des conducteurs, sans les toucher. À l'aide de cerceaux en bois de 66 cm et 91 cm de diamètre, suspendus par des cordes isolantes, il observa que l'effluve électrique peut être transporté le long de la circonférence de ces cerceaux. Il était également capable de passer d'un cerceau à un autre en contact avec le premier cerceau, figure B.15.⁴⁸ Il pouvait également transmettre la vertu électrique à de nombreux fruits et légumes.

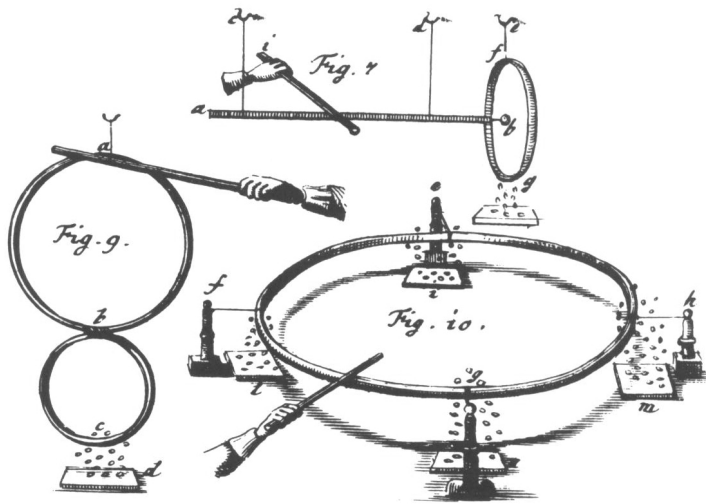


Fig. B.15 : Représentation des expériences de Gray avec des cerceaux en bois soutenus par des cordes isolantes.

Gray a même réussi à faire qu'une bulle de savon attire des corps légers :^{49,50}

⁴⁶Mr. Wheler, soon after my coming to him, procured silk Lines strong enough to bear the Weight of his Footboy, a good stout Lad; then having suspended him upon the Lines, [...].

⁴⁷Dans la version anglaise du livre apparaît la phrase suivante : « D'après tout cela, il est très probable que les cordes faites de cheveux de Gray étaient en soie. » ("From all this it is very probable that Gray's hair lines were made of silk.") Cependant, le mot *hairline* signifiait effectivement à l'origine une corde faite de cheveux, pas de soie. [Note du traducteur.]

⁴⁸[Dop74] et [Hei99, p. 249].

⁴⁹[Gra31a, pp. 38–39].

⁵⁰March the 23d [of 1730], I dissolved Soap in the Thames-Water, then I suspended a Tobacco-Pipe by

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 corde faite de cheveux, de manière à ce qu'elle soit presque à l'horizontale, avec le bec vers le bas ; puis, après l'avoir trempée dans la solution savonneuse et avoir soufflé une bulle, j'ai posé la feuille de laiton sur un support en dessous, j'ai frotté le tube [en verre] et le laiton a été attiré par la bulle lorsque le tube a été approché du fil. J'ai ensuite répété l'expérience avec une autre bulle, en tenant le tube près du petit bout de la pipe, et l'attraction était alors beaucoup plus forte, la feuille de laiton étant attirée à une hauteur de près de deux pouces [5 cm].

Cette expérience, représentée dans la figure B.16 (a), illustre une fois de plus que l'eau douce se comporte comme un conducteur. Gray avait déjà transmis la capacité d'attirer des corps légers à de nombreux conducteurs, tels que les métaux, le bois, etc.

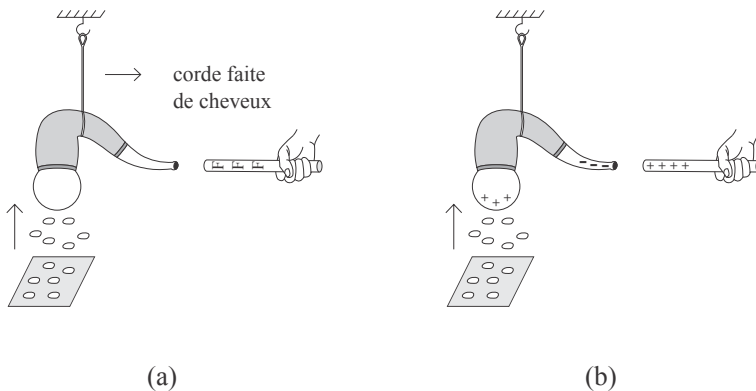


FIG. B.16 : (a) Une bulle de savon attirant des feuilles de laiton lorsque le tube de verre frotté est approché du tuyau suspendu par une corde faite de cheveux, un isolant. (b) Représentation qualitative des charges dans le cas (a).

La figure B.16 (b) donne une représentation qualitative des charges.

B.7 L'expérience avec le garçon suspendu

Dans cet ouvrage publié en 1731, Gray décrit plusieurs expériences dans lesquelles il suspendait un garçon en position horizontale à l'aide de fils, probablement en soie.⁵¹ Par exemple, le visage du garçon étant tourné vers le bas, Gray a tenu le tube de verre frotté près de ses pieds, sans les toucher, et a observé que des feuilles de laiton étaient attirées vers le visage du garçon, se soulevant jusqu'à 30 cm. Une ancienne représentation de cette expérience peut être trouvée dans la figure B.17.⁵²

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 [5 cm].

⁵¹[Gra31a, pp. 39–41].

⁵²[Dop74].

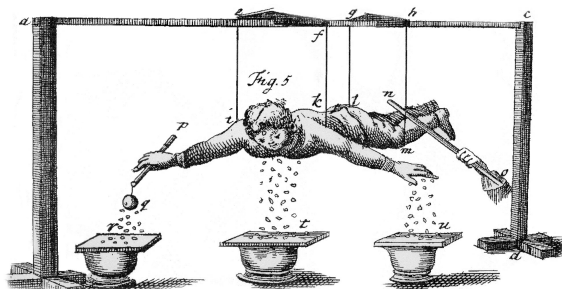


FIG. B.17 : Un garçon est suspendu à des fils isolants. Un tube en verre frotté est approché de ses jambes. Les mains et le visage du garçon attirent les corps légers.

Cette expérience est devenue très célèbre. Elle a été utilisée par Nollet dans le frontispice de son ouvrage *Essai sur l'Électricité des Corps*, figure B.18.⁵³



FIG. B.18 : Représentation de la célèbre expérience de Gray dans le livre de Nollet [Nol53]. Sur cette illustration, on constate que le tube de verre n'a pas besoin d'entrer en contact avec le garçon.

Certaines de ces expériences menées par Gray ont été répétées et approfondies par Du Fay. Par exemple, dans son troisième mémoire, il présente une expérience illustrée ici dans la figure B.19.⁵⁴

Du Fay a décrit cette expérience comme suit (nos italiques) :⁵⁵

⁵³ [Nol53].

⁵⁴ [DF33d, pp. 248–249] et [RR57, p. 584].

⁵⁵ [DF33d, pp. 248–249].

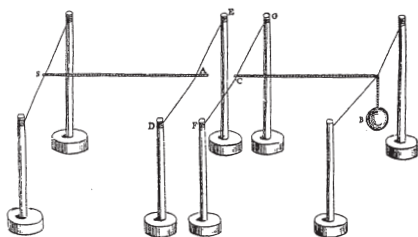


FIG. B.19 : Illustration de l'expérience de Du Fay, analogue à certaines expériences antérieures réalisées par Gray.

J'ai pris deux morceaux d'un cordon de fil [conducteur], gros comme le doigt, dont le premier *SA*, avoit 6 pieds [1.8 m] de long, & l'autre *CB*, en avoit 8 [pieds de long, c'est-à-dire, 2.4 m], je les ai assujettis chacun par un bout à deux brides de soye *DE*, & *FG*, qui les coupoient à angles droits, & qui étoient disposées de sorte qu'approchant ou éloignant parallèlement ces brides l'une de l'autre, les deux bouts des deux cordons s'éloignoient ou s'approchoient l'un de l'autre, de manière qu'on pouvoit les fixer à la distance qu'on souhaitoit. Au bout *B* du cordon de 8 pieds étoit suspenduë une boule de bois, & le bout le plus éloigné du cordon de 6 pieds étoit fixé à une troisième bride de soye en *S* pour la soutenir en l'air; présentant ensuite le tube frotté au bout *S* du cordon *SA*, après avoir éloigné les deux cordons d'un pouce [2,5 cm] l'un de l'autre, l'électricité étoit aussi sensible dans la boule que si le cordon eût été continu [observant que la balle attirait les petites feuilles métalliques placées près d'elle], à [une distance de] 3 pouces elle l'étoit encore beaucoup, à 6 pouces [15 cm] un peu moins, & à 1 pied [30 cm] beaucoup moins, & à peu-près comme à la distance de 1256 pieds de corde continuë [377 m, comme Du Fay l'avait déjà expérimenté auparavant]; la matière électrique coule donc librement dans l'air, sans être fixée par aucun corps. Cette expérience prouve combien il est nécessaire que la corde [conducteuse] dont on se sert pour transmettre au loin l'électricité, soit *isolée*, ou ne soit soutenue que de corps les moins propres qu'il est possible à se charger eux-mêmes de l'électricité.

La description moderne de cette expérience ne repose pas sur une substance électrique circulant librement dans l'air, comme l'imaginait Du Fay. Au lieu de cela, on considère que le phénomène principal de cette expérience est la polarisation électrique des conducteurs, comme dans la figure B.20. Autrement dit, le tube de verre frotté polarise électriquement la corde conductrice *SA* lorsqu'il est approché de celle-ci. Les charges à l'extrémité *A* de cette corde polarisent électriquement un autre conducteur *CB*. Ce conducteur *CB* est composé d'une deuxième corde reliée à une boule en bois. Les deux polarisations ont lieu malgré l'espace d'air entre *A* et *C*, qui varie entre 2,5 cm et 30 cm. Les charges accumulées à l'extrémité inférieure de la boule en bois, qui ont le même signe que les charges sur le tube de verre frotté, attirent les corps légers à proximité.

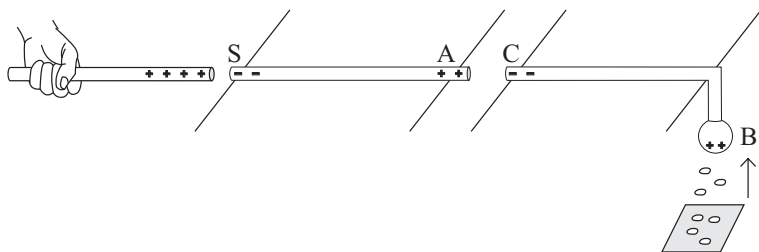


FIG. B.20 : Illustration de la polarisation dans l'expérience de Du Fay, figure B.19. Les conducteurs SA et CB sont soutenus au-dessus de fils de soie isolants.

B.8 La découverte que les charges libres sont réparties sur la surface des conducteurs

Dans la suite de son article de 1731, Gray décrit une autre découverte fondamentale, à savoir (c'est nous qui soulignons en italique) :^{56,57}

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 l'aide de 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 à cheveux, 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 ne semblait pas y avoir 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

⁵⁶[Gra31a, p. 35].

⁵⁷*Some time after, at Mr. Wheler's, we made the following Experiment, in order to try whether the Electrick 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 there seemed to be no more Attraction in the solid than in the hollow Cube; yet I am apt to think that the Electrick 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.

attraction cesse jusqu'à ce que ce corps soit retiré et que l'autre soit à nouveau excité par le tube.

Une représentation de cette expérience est présentée dans la figure B.21.

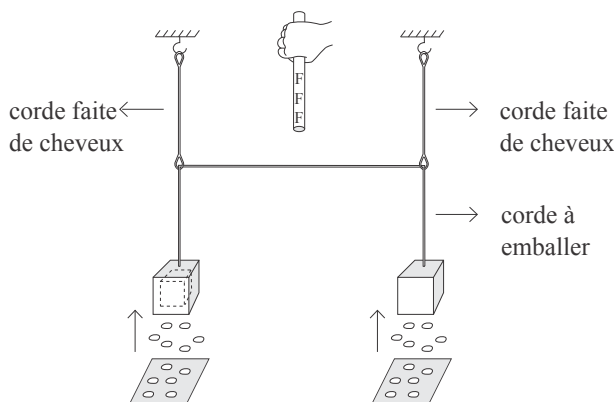


FIG. B.21 : Un cube creux et un cube plein s'attirent avec la même force.

Cette expérience décrit deux découvertes extrêmement importantes. La première est qu'en électrostatique, les charges libres, ou les charges excédentaires sur les conducteurs (comme les cubes de bois conducteurs dans cette expérience), sont réparties sur la surface des conducteurs, et non dans leur volume. Cette propriété fondamentale des conducteurs en équilibre électrostatique est parfois attribuée à Michael Faraday (1791–1867). Cette expérience montre que ce fait était déjà connu de Gray.⁵⁸

La deuxième découverte, exprimée dans la dernière phrase citée ci-dessus, est le fait qu'un conducteur électrisé se décharge lorsqu'il touche un autre conducteur relié à la terre, c'est-à-dire lorsque le conducteur électrisé est mis à la terre. Gray semble faire référence ici à ses expériences de 1708. Voir les sections 4.2 et 4.5.

B.9 La découverte de l'effet de pointe

Au départ, Gray posa la feuille de laiton sur un support, qui était une planche ronde de 30 cm de diamètre, recouverte de papier blanc, posée sur un socle de 30 cm de haut. Dans la suite de son article historique, Gray décrit même une autre découverte très importante, à savoir :^{59, 60}

⁵⁸[CM79, p. 396] et [Hei99, pp. 248–249].

⁵⁹[Gra31a, p. 42].

⁶⁰In these Experiments, besides the large Stand above-mentioned, I made use of two small ones, which, as I found them very useful, it may not be improper to describe them. The Tops of them were three Inches [7.6 cm] Diameter; they were supported by a Column of about a Foot [30 cm] in Hight, their Bases of about four Inches and a half [11.4 cm]: They were turned of *Lignum vitae* [a type of wood], their Tops and Bases made to skrew on for Convenience of Carriage. Upon the Tops were pasted white Paper. When the Leaf-Brass is laid on any of these Stands, I find it is attracted to a much greater Hight than when laid on a Table, and at least three Times higher than when laid on the Floor of a Room.

Dans ces expériences, outre le grand support mentionné ci-dessus, j'ai utilisé deux petits supports qui m'ont été très utiles et qu'il n'est peut-être pas inutile de décrire. Leur partie supérieure mesurait trois pouces [7,6 cm] de diamètre ; ils étaient soutenus par une colonne d'environ un pied [30 cm] de hauteur, leur base mesurant environ quatre pouces et demi [11,4 cm] : Ils étaient tournés en *lignum vitae* [gaïac, un type de bois], leurs sommets et leurs bases étant vissés pour faciliter leur transport. Du papier blanc était collé sur les sommets. Lorsque la feuille de laiton est posée sur l'un de ces supports, je constate qu'elle est attirée à une hauteur beaucoup plus grande que lorsqu'elle est posée sur une table, et au moins trois fois plus haute que lorsqu'elle est posée sur le sol d'une pièce.

Une représentation de cette expérience est présentée dans la figure B.22.

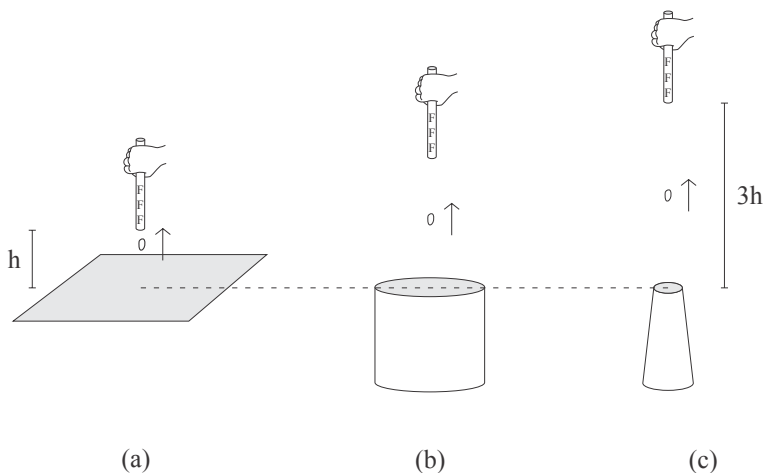


FIG. B.22 : (a) Une petite feuille de laiton est attirée à une hauteur h par rapport à sa position initiale au sol. (b) Elle s'élève plus haut lorsqu'elle est posée sur une table ou sur un cylindre conducteur de 30 cm de diamètre. (c) Lorsqu'elle se trouve sur un conducteur conique, elle est attirée trois fois plus haut que lorsqu'elle est au sol.

Il s'agit de l'une des premières descriptions connues de « l'effet de pointe ». Autrement dit, la force électrique est plus forte autour des zones pointues et acérées des conducteurs qu'autour des surfaces planes.

Dans la section 4.10, nous avons analysé le comportement des flèches fixées à un pendule électrique. Elles pointaient vers la paille frottée avant d'entrer en contact avec celle-ci. Après le contact, elles pointaient dans la direction opposée à la paille. Ce comportement est lié à l'effet de pointe découverte par Gray.

B.10 Conclusions

Il s'agit sans aucun doute de l'un des articles les plus importants de toute l'histoire de l'électricité. Le nombre de découvertes fondamentales réalisées par un simple teinturier à la retraite qui n'a jamais étudié à l'université est vraiment impressionnant.

À cette époque, il était âgé de 63 ans. Nous considérons que la principale contribution de Gray est sa découverte des conducteurs et des isolants. Il a décrit certaines de leurs principales propriétés. Cela a permis de contrôler les phénomènes électriques, ouvrant la voie à une série de nouvelles découvertes qui ont été faites peu après par Gray et d'autres scientifiques. Dans ses autres articles, Gray a décrit de nombreuses découvertes nouvelles extrêmement importantes dans le domaine de l'électricité, mais nous ne les aborderons pas ici.

Du Fay a suivi de près les travaux de Gray et a été fortement influencé par ses articles. Les découvertes de Du Fay sur la répulsion électrique, le mécanisme *ACR* et les deux types d'électricité ont été faites après qu'il ait décidé de reproduire et d'explorer les nombreuses découvertes faites précédemment par Gray. Par exemple, dans l'un de ses travaux les plus importants, Du Fay a déclaré ce qui suit :^{61,62}

Je prie Votre Grâce de bien vouloir transmettre cette lettre à la *Royal Society*, et en particulier à M. *Gray*, qui travaille sur ce sujet avec tant d'application et de succès, et à qui je reconnais ma dette pour les découvertes que j'ai faites, ainsi que pour celles que je pourrais faire à l'avenir ; car c'est à partir de ses écrits que j'ai pris la résolution de me consacrer à ce genre d'expériences.

Nous avons commencé ce livre par une description de l'effet de l'ambre, une expérience connue depuis au moins l'époque de Platon, au IV^e siècle avant J.-C. Nous l'avons conclu par une description des travaux d'un teinturier à la retraite dont les découvertes nous ont permis de faire un grand pas en avant dans notre compréhension de la nature et dans le domaine technique de l'électricité. Les chemins empruntés par la science pour se développer sont vraiment fascinants !

⁶¹[DF34a, pp. 265–266] et [BC07, p. 643].

⁶²I beseech your Grace to communicate it [this letter] to the *Royal Society*, and in particular to Mr. *Gray*, who works on this Subject with so much Application and Success, and to whom I acknowledge my self indebted for the Discoveries I have made, as well as for those I may possibly make hereafter ; since 'tis from his Writings that I took the Resolution of applying my self to this kind of Experiments.

Bibliographie

- [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>.
- [AC11] A. K. T. Assis et 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 et 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>.
- [Aep79] F. U. T. Aepinus. *Aepinus's Essay on the Theory of Electricity and Magnetism*. Princeton University Press, Princeton, 1979. Traduit par P. J. Connor. Monographie introductive et notes par R. W. Home.
- [AH07] A. K. T. Assis et J. A. Hernandez. *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 et J. A. Hernandez. *A Força Elétrica de uma Corrente: Weber e as Cargas Superficiais de Condutores Resistivos com Correntes Constantes*, volume 73 de *Coleção Acadêmica*. Edusp et Edufal, São Paulo et Maceió, 2009.
- [Amp22] A.-M. Ampère. Expériences relatives à de nouveaux phénomènes électrodynamiques. *Annales de Chimie et de Physique*, 20:60–74, 1822.
- [Ari22a] Aristote. *De l'âme*. Traduit par Richard Bodéüs. In *Œuvres complètes*. Sous la direction de Pierre Péglerin. Éditions Flammarion, Paris, 2022, pp. 965–1040.
- [Ari22b] Aristote. *Métaphysique*. Traduit par Marie-Paule Duminil et Annick Jaulin. In *Œuvres complètes*. Sous la direction de Pierre Péglerin. Éditions Flammarion, Paris, 2022, pp. 1735–1969.

- [Ari22c] Aristote. *Météorologiques*. Traduit par Jocelyn Groisard. In *Œuvres complètes*. Sous la direction de Pierre Pégélin. Éditions Flammarion, Paris, 2022, pp. 859–964.
- [Ass08a] A. K. T. Assis. *Archimedes, the Center of Gravity, and the First Law of Mechanics*. Apeiron, Montréal, 1ère édition, 2008. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass08b] A. K. T. Assis. *Arquimedes, o Centro de Gravidade e a Lei da Alavanca*. Apeiron, Montréal, 2008. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [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>.
- [Ass15] 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'Eletricità*. 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>.
- [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>.
- [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>.
- [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>.
- [BC07] S. L. B. Boss et J. J. Caluzi. Os conceitos de eletricidade vítrea e eletricidade resinosa segundo Du Fay. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29:635–644, 2007.
- [BC10] S. L. B. Boss et J. J. Caluzi. Uma breve biografia de Stephen Gray (1666–1736). *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 32:1602–1609, 2010.

- [Ben87] A. Bennet. Description of a new electrometer. *Philosophical Transactions*, 77:26–34, 1787.
- [Ben98] P. Benjamin. *A History of Electricity (The Intellectual Rise in Electricity) from Antiquity to the Days of Benjamin Franklin*. Wiley, New York, 1898.
- [Blo82] C. Blondel. *A.-M. Ampère et la Création de l'Électrodynamique (1820–1827)*. Bibliothèque Nationale, Paris, 1982.
- [Bor d] G. Borvon. Pourquoi deux espèces d'électricité? Pourquoi deux sens du courant électrique? L'histoire de l'électricité nous aide à comprendre. [s.d.] <https://www.ampere.cnrs.fr>.
- [Boy00] R. Boyle. Experiments and notes about the mechanical origine or production of electricity. In M. Hunter et E. B. Davis, éditeurs, *The Works of Robert Boyle*, volume 8, pp. 509–523. Pickering & Chatto, London, 2000. Work originally published in 1675.
- [BW] C. Blondel et B. Wolff. Un tournant dans l'histoire de l'électricité: la mathématisation. <https://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique>.
- [BW12] C. Blondel et B. Wolff. Teinturiers et tubes de verre: Gray et Dufay. 2012. <https://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique>.
- [BW20] C. Blondel et B. Wolff. Que dit l'article ELECTRICITE de l'Encyclopédie? 2020. <https://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique>.
- [CA08] J. Camillo et A. K. T. Assis. Construção de um gerador eletrostático gotejante: chuva elétrica de Kelvin. *A Física na Escola*, 9:29–32, 2008. Vidéo montrant l'étincelle produite dans ce montage: <https://www.ifi.unicamp.br/~assis> et <https://youtu.be/X7WPSQMtIU0>.
- [Can53a] J. Canton. Electrical experiments, with an attempt to account for their several phaenomena; together with observations on thunder-clouds. *Philosophical Transactions*, 48:350–358, 1753.
- [Can53b] J. Canton. A letter to the Right Honourable the Earl of Macclesfield, President of the Royal Society, concerning some new electrical experiments. *Philosophical Transactions*, 48:780–785, 1753.
- [CC00] D. H. Clark et S. P. H. Clark. *Newton's Tyranny: The Suppressed Scientific Discoveries of Stephen Gray and John Flamsteed*. Freeman, New York, 2000.
- [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*. PhD, University of Campinas – UNICAMP, Campinas, Brazil, 2009. Superviseur: A. K. T. Assis. <https://>

repositorio.unicamp.br/Acervo/Detalhe/435449 et <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.

- [Chi54] R. A. Chipman. An unpublished letter of Stephen Gray on electrical experiments, 1707–1708. *Isis*, 45:33–40, 1954.
- [CM79] D. H. Clark et L. Murdin. The enigma of Stephen Gray astronomer and scientist (1666–1736). *Vistas in Astronomy*, 23:351–404, 1979.
- [Des41a] J. T. Desaguliers. Experiments made before the Royal Society, Feb. 2. 1737–8. *Philosophical Transactions*, 41(454):193–199, 1739–1741.
- [Des41b] J. T. Desaguliers. Several Electrical Experiments, made at various Times, before the Royal Society. *Philosophical Transactions*, 41(460):661–667, 1739–1741.
- [Des41c] J. T. Desaguliers. Some Thoughts and Experiments concerning Electricity. *Philosophical Transactions*, 41(454):186–193, 1739–1741.
- [DF33a] C. F. d. C. Du Fay. Premier mémoire sur l'électricité. Histoire de l'Électricité. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, pp. 23–35. In *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Imprimerie Royale, Paris, 1733.
- [DF33b] C. F. d. C. Du Fay. Quatrième mémoire sur l'électricité. De l'Attraction & Répulsion des Corps Électriques. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, pp. 457–476. In *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Imprimerie Royale, Paris, 1733.
- [DF33c] C. F. d. C. Du Fay. Second mémoire sur l'électricité. Quels sont les Corps qui sont susceptibles d'Électricité. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, pp. 73–84. In *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Imprimerie Royale, Paris, 1733.
- [DF33d] C. F. d. C. Du Fay. Troisième mémoire sur l'électricité. Des Corps qui sont le plus vivement attirés par les matières électriques, et de ceux qui sont les plus propres à transmettre l'Électricité. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, pp. 233–254. In *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Imprimerie Royale, Paris, 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. MD. *Philosophical Transactions*, 38(431):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 sa force, comme la température de l'air, le vuide, l'air comprimé, &c. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, pp. 341–361. In *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Imprimerie Royale, Paris, 1734.

- [DF34c] C. F. d. C. Du Fay. Sixième mémoire sur l'électricité. Où l'on examine quel rapport il y a entre l'Électricité, & la faculté de rendre de la Lumière, qui est commune à la plupart des corps électriques, & ce qu'on peut inférer de ce rapport. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, pp. 503–526. In *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Imprimerie Royale, Paris, 1734.
- [DF37a] C. F. d. C. Du Fay. Huitième mémoire sur l'électricité. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, pp. 307–325. In *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Imprimerie Royale, Paris, 1737.
- [DF37b] C. F. d. C. Du Fay. Septième mémoire sur l'électricité. Contenant quelques Additions aux Mémoires précédents. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, pp. 86–100. In *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Imprimerie Royale, Paris, 1737.
- [Dop74] J. G. Doppelmayr. *Neu-entdeckte Phaenomena von bewunderswürdigen Wirkungen der Natur*. Nürnberg, 1774.
- [Fer78] N. C. Ferreira. Proposta de Laboratório para a Escola Brasileira — Um Ensaio sobre a Instrumentalização no Ensino Médio de Física. Maîtrise, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 1978.
- [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.
- [Fer da] N. C. Ferreira. Construa sua própria bússola! [s.d.] <https://chc.org.br/acervo/construa-sua-propria-bussola>.
- [Fer db] N. Ferreira, [s. d.]. *Eletrostática*, volume 1. Instituto de Física, USP, São Paulo. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino. [s.d.]
- [Fer dc] N. Ferreira, [s. d.]. *Eletrostática*, volume 2. Instituto de Física, USP, São Paulo. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino. [s.d.]
- [Fer dd] N. Ferreira. *Mecânica*. Instituto de Física, USP, São Paulo. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino. [s.d.]
- [Fig67] L. Figuiet. *Les Merveilles de la Science ou Description Populaire des Inventions Modernes*, volume 1. Jouvett et Cie., Paris, 1867.

- [Fig85] L. G. Figuiet. *Les Merveilles de l'Électricité*. Association pour l'Histoire de l'Électricité en France, Paris, 1985. Textes choisis présentés par Fabienne Cardot.
- [FM91] N. Ferreira et J.-P. Maury. *Plus et Moins, les Charges Électriques. Qu'est-ce que c'est?* Ophrys, Paris, 1991.
- [Fra55] G. Fracastoro. *De sympathia & antipathia rerum*. In: *Opera omnia in unum proxime post ilius mortem collecta*. Apud Iuntas, Venice, 1555.
- [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.
- [Gas03] A. Gaspar. *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental*. Ática, São Paulo, 2003.
- [GG90] I. Grattan-Guinness. *Convolutions in French Mathematics, 1800–1840*, volume 2. Birkhäuser, Basel, 1990.
- [GG91] I. Grattan-Guinness. Lines of mathematical thought in the electrodynamics of Ampère. *Physis*, 28:115–129, 1991.
- [Gil00a] W. Gilbert. *De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure; physiologia nova*. London, 1600.
- [Gil00b] 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.
- [Gil78] W. Gilbert. *On the Loadstone and Magnetic Bodies and on the Great Magnet the Earth*, volume 28, pp. 1–121 de *Great Books of the Western World*. Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1978. Traduit par P. F. Mottelay.
- [Gli33] M. Gliozzi. L'elettrologia nel secolo XVII. *Periodico di Matematiche*, 13:1–14, 1933.
- [Gra20] S. Gray. An Account of some new Electrical Experiments. *Philosophical Transactions*, 31(366):104–107, 1720–1.
- [Gra31a] S. Gray. A Letter to Cromwell Mortimer, M. D. Secr. R. S. containing several Experiments concerning Electricity. *Philosophical Transactions*, 37(417):18–44, 1731–2.
- [Gra31b] S. Gray. A Letter concerning the Electricity of Water, from Mr. Stephen Gray to Cromwell Mortimer, M. D. Secr. R. S. *Philosophical Transactions*, 37(422):227–230, 260, 1731–2.
- [Gra31c] S. Gray. A Letter from Mr. Stephen Gray to Dr. Mortimer, Secr. R. S. containing a farther Account of his Experiments concerning Electricity. *Philosophical Transactions*, 37(423):285–291, 1731–2.

- [Gra31d] S. Gray. Two Letters from Mr. Stephen Gray, F. R. S. to C. Mortimer, M. D. Secr. R. S. concerning farther Accounts of his Experiments concerning Electricity. *Philosophical Transactions*, 37(426):397–407, 1731–2.
- [Gra35a] S. Gray. Experiments and Observations upon the Light that is produced by communicating Electrical Attraction to animal or inanimate Bodies, together with some of its most surprising effects; communicated in a Letter from Mr. Stephen Gray to Cromwell Mortimer, M. D. R. S. Secr. *Philosophical Transactions*, 39(436):16–24, 1735–6.
- [Gra35b] S. Gray. A Letter from Stephen Gray, F. R. S. to Cromwell Mortimer, Secr. R. S. containing some Experiments relating to Electricity. *Philosophical Transactions*, 39(439):166–170, 1735–6.
- [Gra35c] S. Gray. Mr. Stephen Gray, F. R. S. his last Letter to Granville Wheeler, Esq; F.R.S. concerning the Revolutions which small pendulous Bodies will, by Electricity, make round larger ones from West to East as the planets do round the Sun. *Philosophical Transactions*, 39(441):220, 1735–6.
- [Gra35d] S. Gray. An Account of some Electrical Experiments intended to be communicated to the Royal Society by Mr. Stephen Gray, F.R.S. taken from his Mouth by Cromwell Mortimer, M. D. R. S. Secr. on Feb. 14, 1735–6. Being the day before he died. *Philosophical Transactions*, 39(444):400–403, 1735–6.
- [GS89] G. Gaudenzi et R. Satolli. *Jean-Paul Marat: Scienziato e Rivoluzionario*. Murisia, Milano, 1989.
- [Gue94] O. v. Guericke. *The New (So-Called) Magdeburg Experiments of Otto von Guericke*, volume 137 des *Archives Internationales d’Histoire des Idées*. Kluwer, Dordrecht, 1994. Traduction et préface par M. G. F. Ames.
- [Gui05] A. P. Guimarães. *From Lodestone to Supermagnets*. Wiley, Berlin, 2005.
- [Hau06] F. Hauksbee. An account of an experiment made before the Royal Society at Gresham-Colledge, touching the extraordinary elisticity of glass, produceable on a smart attrition of it; with a continuation of experiments on the same subject, and other phenomena. *Philosophical Transactions*, 25(308):2327–2335, 1706–1707.
- [Hau08] 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(315):82–86, 1708–1709.
- [Hau09] F. Hauksbee. *Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects, containing an Account of Several Surprising Phenomena touching Light and Electricity, producible on the Attrition of Bodies. With many other Remarkable Appearances, not before observ’d*. R. Brugis, London, 1709.

- [Hea67] N. H. d. V. Heathcote. The early meaning of electricity: Some Pseudodoxia Epidemica — I. *Annals of Science*, 23:261–275, 1967.
- [Hei79] J. L. Heilbron. *Electricity in the 17th & 18th Centuries*. University of California Press, Berkeley, 1979.
- [Hei81a] J. L. Heilbron. Aepinus, Franz Ulrich Theodosius. In C. C. Gillispie, éditeur, *Dictionary of Scientific Biography*, volume 1, pp. 66–68. Charles Scribner’s Sons, New York, 1981.
- [Hei81b] J. L. Heilbron. Dufay (Du Fay), Charles-François de Cisternay. In C. C. Gillispie, éditeur, *Dictionary of Scientific Biography*, volume 4, pp. 214–217. Charles Scribner’s Sons, New York, 1981.
- [Hei81c] J. L. Heilbron. Gray, Stephen. In C. C. Gillispie, éditeur, *Dictionary of Scientific Biography*, volume 5, pp. 515–517. Charles Scribner’s Sons, New York, 1981.
- [Hei81d] J. L. Heilbron. Hauksbee, Francis. In C. C. Gillispie, éditeur, *Dictionary of Scientific Biography*, volume 6, pp. 169–175. Charles Scribner’s Sons, New York, 1981.
- [Hei81e] J. L. Heilbron. Nollet, Jean-Antoine. In C. C. Gillispie, éditeur, *Dictionary of Scientific Biography*, volume 10, pp. 145–148. Charles Scribner’s Sons, New York, 1981.
- [Hei82] J. L. Heilbron. *Elements of Early Modern Physics*. University of California Press, Berkeley, 1982.
- [Hei99] J. L. Heilbron. *Electricity in the 17th and 18th Centuries — A Study in Early Modern Physics*. Dover, New York, 1999.
- [Hem80] L’abbé Hemmer. Sur l’électricité des métaux. *Journal de Physique*, 16:50–52, 1780.
- [Hom67] R. W. Home. Francis Hauksbee’s theory of electricity. *Archive for the History of Exact Sciences*, 4:203–217, 1967. Réimprimé in R. W. Home, *Electricity and Experimental Physics in 18th-Century Europe* (Variorum, Hampshire, 1992), Chapter III.
- [Hom81] R. W. Home. *The Effluvial Theory of Electricity*. Arno Press, New York, 1981.
- [Jac99] J. D. Jackson. *Classical Electrodynamics*. John Wiley & Sons, New York, third edition, 1999.
- [Kel81] S. Kelly. Gilbert, William. In C. C. Gillispie, éditeur, *Dictionary of Scientific Biography*, volume 5, pp. 396–401. Charles Scribner’s Sons, New York, 1981.
- [Kra81] F. Krafft. Guericke, (Gericke), Otto von. In C. C. Gillispie, éditeur, *Dictionary of Scientific Biography*, volume 5, pp. 574–576. Charles Scribner’s Sons, New York, 1981.

- [Lae] Diogène Laërce. Livre I: Prologue; Les Sages. Traduit par Richard Goulet. In *Vies et doctrines des philosophes illustres*. Traduction française sous la direction de Marie-Odile Goulet-Cazé. Hachette, Paris, 1999.
- [Llo80] J. T. Lloyd. Lord Kelvin demonstrated. *The Physics Teacher*, 18:16–24, 1980.
- [Llo07] J. T. Lloyd. Lorde Kelvin demonstrado. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29:499–508, 2007. Traduction par A. K. T. Assis de J. T. Lloyd, “Lord Kelvin demonstrated,” *The Physics Teacher*, volume 18, pp. 16–24 (1980).
- [Max81] J. C. Maxwell. *An Elementary Treatise on Electricity*. Clarendon Press, Oxford, 1881.
- [Med02] A. Medeiros. As origens históricas do eletroscópio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 24:353–361, 2002.
- [Mel98] M. A. Melehy. Thermal momentum in thermodynamics, part 2. Interfacial electrification: a new consequence of the first and second laws. *Physics Essays*, 11:430–433, 1998.
- [Net] L. F. Netto. Feira de ciências.
- [New77a] I. Newton. *Optique*. Tome Premier. Chez Leroy, Paris, France, 1777.
- [New77b] I. Newton. *Optique*. Tome Second. Chez Leroy, Paris, France, 1777.
- [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.
- [New90b] I. Newton. *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*. Tome II. Éditions Jacques Gabay, Sceaux, France, 1990. Traduit par feu Madame la Marquise du Chastellet. Réimpression de la publication de 1759.
- [New90c] I. Newton. *Principia — Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*. Nova Stella/Edusp, São Paulo, 1990. Livro I: O Movimento dos Corpos. Traduction par T. Ricci, L. G. Brunet, S. T. Gehring et M. H. C. Célia.
- [New96] I. Newton. *Óptica*. Edusp, São Paulo, 1996. Traduction, introduction et notes par A. K. T. Assis.
- [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.

- [Nol47] L'Abbé Nollet. Éclaircissemens sur plusieurs faits concernant l'électricité. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, pp. 102–131. In *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Imprimerie Royale, Paris, 1747.
- [Nol53] J. A. Nollet. *Essai sur l'Électricité des Corps*. Frères Guerin, Paris, 3ème édition, 1753.
- [Nol67] J. A. Nollet. *Lettres sur l'électricité, dans lesquelles on trouvera les principaux phénomènes qui ont été découverts depuis 1760, avec des discussions sur les conséquences qu'on en peut tirer*. Durand, Neveu, Libraire, Paris, 1767. Troisième partie.
- [Ørs98a] H. C. Ørsted. New electro-magnetic experiments. In K. Jøved, A. D. Jackson, et O. Knudsen, éditeurs, *Selected Scientific Works of Hans Christian Ørsted*, pp. 421–424. Princeton University Press, Princeton, 1998. Article initialement publié en allemand en 1820.
- [Ørs98b] H. C. Ørsted. Observations on electro-magnetism. In K. Jøved, A. D. Jackson, et O. Knudsen, éditeurs, *Selected Scientific Works of Hans Christian Ørsted*, pp. 430–445. Princeton University Press, Princeton, 1998. Réimprimé de Thomson, *Annals of Philosophy*, volume 2, pp. 321–337 (1821).
- [Pla11a] Platon. *Protagoras*. Traduit par Frédérique Ildefonse. In *Œuvres complètes*. Sous la direction de Luc Brisson. Éditions Flammarion, Paris, 2011, pp. 1435–1480.
- [Pla11b] Platon. *Timée*. Traduit par Luc Brisson. In *Œuvres complètes*. Sous la direction de Luc Brisson. Éditions Flammarion, Paris, 2011, pp. 1977–2050.
- [Pri72] J. Priestley. An account of a new electrometer, contrived by Mr. William Henly, and of several electrical experiments made by him, in a letter from Dr. Priestley, F.R.S. to Dr. Franklin, F.R.S. *Philosophical Transactions*, 62:359–364, 1772.
- [Pri66] J. Priestley. *The History and Present State of Electricity*, volume 1. Johnson Reprint Corporation, New York, 1966. The Sources of Science, Number 18. Réimprimé de la 3ème édition, London, 1775.
- [Que] A. C. M. d. Queiroz. Electrostatic machines. <https://www.coe.ufrj.br/~acmq>.
- [RR53] D. Roller et D. H. D. Roller. The prenatal history of electrical science. *American Journal of Physics*, 21:343–356, 1953.
- [RR57] D. Roller et D. H. D. Roller. The Development of the Concept of Electric Charge. In J. B. Conant, éditeur, *Harvard Case Studies in Experimental Science*, chapitre 8, pp. 541–639. Harvard University Press, Cambridge, 1957.

- [Sas02] W. M. Saslow. *Electricity, Magnetism, and Light*. Academic Press, New York, 2002.
- [The56] Theophrastus. *Theophrastus on Stones*. The Ohio State University, Columbus, 1956. Introduction, texte grec, traduction anglaise et commentaires par E. R. Caley and J. F. C. Richards.
- [Tho] 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.
- [Wal36] W. C. Walker. The detection and estimation of electric charges in the eighteenth century. *Annals of Science*, 1:66–100, 1936.
- [Wil59] B. Wilson. Experiments on the tourmalin. *Philosophical Transactions*, 51:308–339, 1759.
- [WB11] B. Wolff et C. Blondel. Quelques questions encore posées aujourd’hui par l’histoire de l’électrostatique. *BUP*, 105(934):705–717, 2011.
- [Zan81] B. Zanobio. Fracastoro, Girolamo. In C. C. Gillispie, éditeur, *Dictionary of Scientific Biography*, volume 5, pp. 104–107. Charles Scribner’s Sons, New York, 1981.

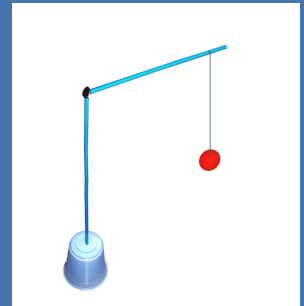
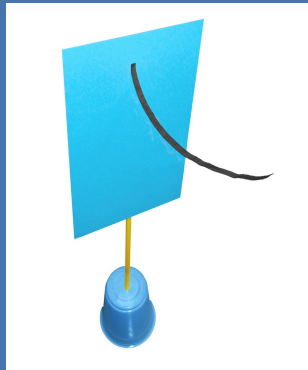
Les fondements expérimentaux et historiques de l'électricité aborde les aspects les plus fondamentaux de la physique. L'ouvrage décrit les principales expériences et découvertes de l'histoire de l'électricité. Il commence par l'effet de l'ambre, qui s'apparente à l'expérience courante consistant à attirer de petits morceaux de papier à l'aide d'un morceau de plastique frotté contre les cheveux. Il explique comment construire plusieurs instruments : le versorium, le pendule électrique, l'électroscope et les collecteurs de charge. Il aborde l'attraction et la répulsion électriques, les charges positives et négatives, ainsi que le mécanisme ACR (attraction, communication de l'électricité et répulsion).



Il analyse les concepts de conducteurs et d'isolants, ainsi que les principales différences de comportement entre ces deux types de substances. Toutes les expériences sont clairement décrites et réalisées à l'aide de matériaux simples et peu coûteux. Ces expériences permettent d'aboutir à des concepts, des définitions et des lois claires décrivant ces phénomènes. Les aspects historiques sont présentés, accompagnés de citations pertinentes des principaux scientifiques. L'ouvrage propose une analyse exhaustive des travaux de Stephen Gray (1666-1736), le grand scientifique britannique qui a découvert les conducteurs et les isolants, ainsi que certaines de leurs principales propriétés. Une bibliographie abondante 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.if.unicamp.br/~assis>

ISBN 978-1-9879804-7-9



9 781987 980479