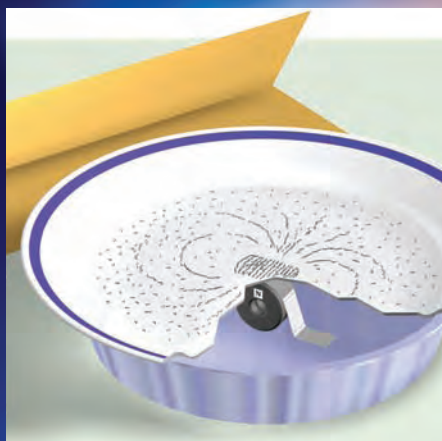


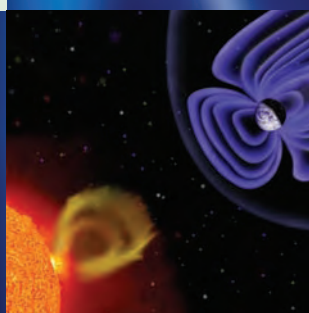
PIERRE LANGLOIS



Sur la route de l'électricité



1 Le magnétisme des aimants et l'électricité statique



ÉDITIONS
MULTIMONDES

PIERRE LANGLOIS

Sur la route de
l'électricité

1 Le magnétisme des aimants
et l'électricité statique

ÉDITIONS
MULTIMONDES

Illustrations: Pierre Langlois

Révision: Marie-Hélène Tremblay

Photos de la couverture: Décharges électriques d'une machine Van de Graaff (Museum of Science de Boston, voir photographie originale p. 88); dessin de la magnétosphère terrestre (Steele Hill-SOHO/NASA); portrait de Coulomb (Réunion des Musées Nationaux/Art Resource. NY); portraits de Gilbert et de Gauss (Musée de la civilisation de Québec); portrait de Cottrell (Research Corporation); portrait de Carlson (Xerox); portraits de Guericke, Dufay, Franklin et Faraday, ainsi que la machine électrostatique du 18^e siècle (collection de Pierre Langlois); dessin de l'expérience maison sur les spectres magnétiques (Pierre Langlois).

Impression: LithoChic

© Éditions MultiMondes, 2005

ISBN 2-89544-075-1

Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Québec, 2005

Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Canada, 2005

ÉDITIONS MULTIMONDES

930, rue Pouliot

Sainte-Foy (Québec) G1V 3N9

CANADA

Téléphone: (418) 651-3885

Téléphone sans frais depuis l'Amérique du Nord: 1 800 840-3029

Télécopie: (418) 651-6822

Télécopie sans frais depuis l'Amérique du Nord: 1 888 303-5931

multimondes@multim.com

<http://www.multim.com>

DISTRIBUTION EN LIBRAIRIE AU CANADA

PROLOGUE INC.

1650, boul. Lionel-Bertrand

Boisbriand (Québec) J7H 1N7

CANADA

Téléphone: (450) 434-0306

Tél. sans frais: 1 800 363-2864

Télécopie: (450) 434-2627

Télec. sans frais: 1 800 361-8088

prologue@prologue.ca

<http://www.prologue.ca>

DISTRIBUTION EN FRANCE

LIBRAIRIE DU QUÉBEC

30, rue Gay-Lussac

75005 Paris

FRANCE

Téléphone: 01 43 54 49 02

Télécopie: 01 43 54 39 15

liquebec@noos.fr

<http://www.libriszone.com/lib/>

indexquebec.htm

DISTRIBUTION EN BELGIQUE

LIBRAIRIE FRANÇAISE

ET QUÉBÉCOISE

Avenue de Tervuren 139

B-1150 Bruxelles

BELGIQUE

Téléphone: +32 2 732.35.32

Télécopie: +32 2 732.42.74

info@vanderdiff.com

<http://www.vanderdiff.com/>

DISTRIBUTION EN SUISSE

SERVIDIS SA

Rue de l'Etraz, 2

CH-1027 LONAY

SUISSE

Téléphone: (021) 803 26 26

Télécopie: (021) 803 26 29

pgavillet@servidis.ch

<http://www.servidis.ch>

Les Éditions MultiMondes reconnaissent l'aide financière du gouvernement du Canada par l'entremise du Programme d'aide au développement de l'industrie de l'édition (PADIE) pour leurs activités d'édition. Elles remercient la Société de développement des entreprises culturelles du Québec (SODEC) pour son aide à l'édition et à la promotion.

Gouvernement du Québec – Programme de crédit d'impôt pour l'édition de livres – gestion SODEC.

Nous remercions le Conseil des Arts du Canada de l'aide accordée à notre programme de publication.

IMPRIMÉ AU CANADA/PRINTED IN CANADA

*Aux philosophes
de la Nature
d'hier,
d'aujourd'hui
et de demain.*

Catalogage avant publication de Bibliothèque et Archives Canada

Langlois, Pierre, 1951-

Sur la route de l'électricité

L'ouvrage complet comprendra 3 v.

Comprend des réf. bibliogr.

Sommaire: v. 1. Le magnétisme et l'électricité statique.

ISBN 2-89544-075-1 (v. 1)

1. Électricité – Histoire. 2. Magnétisme – Histoire. 3. Électromagnétisme – Histoire.
4. Électricité – Expériences. 5. Magnétisme – Expériences. 6. Électromagnétisme –
Expériences. I. Titre.

QC507.L36 2005

537'.09

C2005-941155-4

Préface

Pour la très grande majorité d'entre nous, l'électricité représente soit de grandes entreprises de production ou de transport d'énergie, une facture à payer à la fin du mois ou un choc électrique, c'est-à-dire un certain danger, une force mystérieuse. Pourtant, l'électricité soutient de manière fondamentale notre confort et notre bien-être, de même que l'organisation de nos sociétés. Nous sommes certainement conscients de notre extrême dépendance vis-à-vis de l'électricité, et nous nous en rendons bien compte surtout lors des grandes pannes de courant.

Contrairement aux autres forces fondamentales de la nature (la gravitation, la force nucléaire et la force électro-faible) que nous avons aussi appris à comprendre, à utiliser et à contrôler jusqu'à un certain point, la force électrique est entrée dans nos vies et nos sociétés d'une façon qui a complètement transformé les moyens de nous transporter, de nous nourrir, de nous instruire et de nous soigner.

Pourtant, nous comprenons mal ce qu'est exactement l'électricité. L'objectif du magnifique ouvrage *Sur la route de l'électricité* signé par Pierre Langlois est de démontrer par l'histoire et l'expérimentation que l'électricité, cette force invisible, peut être sentie, dirigée et comprise; l'électricité est notre grande alliée pour faire face aux défis que pose la démographie croissante à l'environnement et aux ressources naturelles dont nous dépendons. Plus important, Pierre Langlois décrit la fascinante aventure de la découverte de l'électricité et du magnétisme, unifiés au 19^e siècle par le physicien James Clerk Maxwell. La démarche intellectuelle de cette belle histoire représente un des plus beaux tableaux de l'histoire des sciences et des techniques. Pierre Langlois peint ce tableau avec une adresse extraordinaire.

Dans cet ouvrage unique, Pierre Langlois déchire élégamment le voile qui cache la nature de l'électricité et ses milliers de manifestations, certaines sont en effet fort étranges. L'auteur le fait d'une façon qui fascinera à la fois les jeunes et les moins jeunes. Il étonnera même les experts, les ingénieurs, les physiciens et tous les professionnels qui œuvrent dans les domaines directement reliés à l'utilisation de l'électricité.

Sur la route de l'électricité est un guide extraordinaire pour un voyage fascinant à travers des expériences extraordinaires que vous pourrez accomplir avec des moyens simples. Émotion, créativité et plaisir en sont les mots clés.

L'auteur, Pierre Langlois, est non seulement un scientifique rigoureux et érudit, mais aussi un pédagogue sans égal. Il démontre dans cet ouvrage une grande habileté technique et une superbe sensibilité à l'efficacité de l'apprentissage. La conception et la réalisation des expériences décrites dans cet ouvrage représentent un chef-d'œuvre pédagogique.

Partez en voyage *Sur la route de l'électricité* et laissez-vous guider par Pierre Langlois. Préparez-vous à plusieurs excursions vers vos quincailleries et pharmacies préférées...

Jean-René Roy

Astrophysicien
Directeur scientifique
Observatoire Gemini, Hawaï

Remerciements

La première personne que j'aimerais remercier du fond du cœur est mon épouse, Léopoldina, qui m'a toujours appuyé dans cette aventure. Elle a dû composer avec un mari souvent absent, qui a passé des milliers d'heures sur ce projet, en plus de son travail régulier. Ses critiques positives ont souvent contribué à rendre plus claires mes explications, puisque comme elle me le dit souvent: «Si je peux comprendre, moi qui ne suis pas une scientifique (c'est une artiste), les autres devraient comprendre également». La vie m'a gâté en me permettant de cheminer, depuis 1972, avec une femme aussi complice et compréhensive.

Un heureux hasard a voulu que je rencontre Marie-Dominic Labelle en 1984, alors qu'elle travaillait au *Musée du Séminaire de Québec* (aujourd'hui le Musée de l'Amérique française). Elle cherchait un scientifique qui pourrait collaborer avec le Musée pour mettre en place une activité pour les jeunes, en utilisant sa merveilleuse collection d'instruments scientifiques anciens. Elle m'a ainsi offert l'occasion de mettre au point l'approche pédagogique du présent ouvrage, basée sur l'histoire et les expériences maison. Elle n'a jamais cessé de m'encourager depuis et de m'ouvrir des portes. Je lui serai toujours grandement reconnaissant pour tout ce qu'elle a fait et j'en profite pour saluer son enthousiasme et son dynamisme contagieux.

Marie-Dominic Labelle m'a fait rencontrer Gilles Angers, du quotidien *Le Soleil* de Québec, en septembre 1984. C'est ainsi qu'est née une belle collaboration qui m'a forcé à mettre sur papier les premières ébauches du présent livre dans une chronique hebdomadaire pour les jeunes, dans le journal. Je suis très reconnaissant à Gilles Angers de m'avoir montré un style d'écriture permettant un contact intime avec le lecteur. Ses conseils m'ont été très précieux et son caractère chaleureux et jovial a transformé nos rencontres en parties de plaisir.

Des rencontres sporadiques avec deux physiciens, que j'admire pour leur engagement au niveau de la pédagogie, m'ont énormément stimulé. Il s'agit de Jean-René Roy, de l'Observatoire Gemini à Hawaï, et Louis Taillefer, de l'Université de Sherbrooke. J'aimerais leur exprimer ici ma profonde gratitude pour leurs encouragements

sincères si motivants. Ils sont des exemples vivants comme quoi on peut faire un travail très sérieux et accaparant tout en conservant intact son sens de l'émerveillement et son humanisme.

Je voudrais aussi remercier chaleureusement Jean-Marc Gagnon et Lise Morin, mes éditeurs, qui ont cru en moi dès notre première rencontre, plusieurs années avant la parution de ce livre. Je salue leur engagement et leur persévérance en matière de diffusion de la culture scientifique.

Pour effectuer les recherches historiques, j'ai heureusement pu compter sur deux centres de références particulièrement riches en écrits scientifiques anciens. Il s'agit de la *Bibliothèque du Séminaire de Québec du Musée de la civilisation*, de même que la section des *Livres rares et collections spéciales de la Direction des bibliothèques de l'Université de Montréal*. Je remercie particulièrement deux bibliothécaires, M^{mes} Tran à Québec et Simoneau à Montréal.

Je me dois également de souligner la collaboration de mes enfants, Julie, Hélène et Michel, ainsi que leurs amis(es). Ils ont bien voulu me faire part de leurs commentaires et m'aider à valider plusieurs aspects de *Sur la route de l'électricité*. Leurs encouragements ainsi que ceux de ma famille et de mes amis(es) ont également été d'un grand réconfort. Je leur en suis tous très reconnaissant.

La vie a mis sur mon chemin un homme bien au fait du système d'éducation, Jacques Samson, ancien enseignant, directeur d'école, puis directeur de Commission scolaire. Je lui exprime ici ma profonde gratitude pour les merveilleux échanges «philosophiques» que nous avons eus sur l'éducation des jeunes d'aujourd'hui, lors de nos multiples randonnées à vélo dans la nature.

Enfin, je remercie, d'une façon toute spéciale, les jeunes qui ont assisté à mes ateliers et qui, avec leurs grands yeux brillants, leur soif de connaissances et leur attitude reconnaissante m'ont incité à poursuivre cette «quête pédagogique» afin de trouver des façons d'allumer en eux des flammes et non seulement emmagasiner des connaissances.

Avant-propos

Un besoin à combler

La physique est ce qu'on appelle une *science dure*, et elle apparaît rébarbative à beaucoup de jeunes. Pourtant, elle peut nous dévoiler tant de merveilles sur l'univers qui nous entoure, que ce soit sur les atomes, les galaxies, l'électricité ou la lumière.

Afin de stimuler le goût des sciences auprès des jeunes, on a vu apparaître, depuis quelques décennies, des organismes de promotion du loisir scientifique. Dans ce contexte, plusieurs livres d'éveil scientifique de qualité ont vu le jour. Toutefois, ces livres, qui s'adressent aux jeunes de moins de 12 ans, ne proposent pas, généralement, une démarche pédagogique structurée pour l'apprentissage d'une science.

La démarche pédagogique est à l'heure actuelle l'apanage des manuels scolaires, dans lesquels on retrouve une approche plutôt formelle de la physique, avec un accent important mis sur les mathématiques. Cet aspect des sciences est évidemment nécessaire, mais il manque d'autres aspects importants et captivants, que l'on retrouve dans *Sur la route de l'électricité*.

Cet ouvrage se situe à mi-chemin entre les livres d'éveil scientifique et les manuels scolaires. Les enseignants y trouveront un matériel complémentaire stimulant pour leurs cours de physique, et les adolescents, un divertissement scientifique à leur niveau.

Histoire et expériences maison

Sur la route de l'électricité est divisé en trois volumes qui présentent un récit vivant et structuré, intégrant étroitement l'histoire des sciences et l'expérimentation maison.

L'accent est mis sur la compréhension de la démarche des savants et la reproduction de leurs expériences historiques avec du matériel qu'on trouve chez soi ou à la quincaillerie du quartier. Le niveau mathématique est maintenu à son strict minimum et les pages sont abondamment illustrées de gravures anciennes, pour l'aspect historique, et d'images de synthèse, pour illustrer les expériences maison.

Infographie

Au début, l'auteur avait pensé photographier les expériences qu'il avait mises au point, pour les illustrer. Mais, il est vite apparu que l'infographie offre plus de possibilités, en rendant les détails plus explicites et faciles à comprendre. L'auteur a donc opté pour des images de synthèse qu'il a dessinées lui-même.

Émotion, créativité et plaisir

Dans cette nouvelle approche, l'émotion, la créativité et le plaisir sont à l'honneur. Dans la vie, l'émotion suscitée par une expérience vécue nous marque plus profondément que si on en avait simplement entendu parler.

Il en est de même en science. En réalisant soi-même une expérience scientifique, l'émotion d'émerveillement qui s'ensuit favorise l'intégration des connaissances.

Sans compter qu'en expérimentant soi-même, on peut varier les conditions de l'expérience pour vérifier certaines hypothèses qui nous viennent à l'esprit. Cette démarche expérimentale renforce la compréhension des phénomènes et valorise l'apprenti savant qui dort en chacun de nous.

D'autre part, un(e) bon(ne) scientifique ne peut pas s'appuyer uniquement sur des connaissances intellectuelles. Il (elle) doit également avoir une bonne dose de créativité. Il est donc important de favoriser le développement de cette qualité. Or, ce que nous propose l'histoire des sciences, c'est justement l'histoire de la créativité. De plus, le fait de reproduire les expériences de grands savants, avec du matériel domestique, enseigne au lecteur l'art de créer à partir de peu de chose.

Enfin, les yeux brillants et écarquillés des jeunes qui font les expériences, comme l'auteur en a souvent vus, sont un gage du plaisir qu'ils y trouvent. Et le plaisir constitue une grande source de motivation pour faciliter l'apprentissage.

Jeunes et moins jeunes

En fait, l'auteur a conçu cet ouvrage en ayant à l'esprit ce qu'il aurait lui-même aimé avoir comme premier cours d'électricité et de magnétisme, avant d'aborder l'aspect plus formel et mathématique.

Sur la route de l'électricité s'adresse principalement aux jeunes de 13 ans et plus, mais aussi à toute personne qui veut en savoir davantage sur la grande aventure de l'électricité, qu'elle soit une maman, un grand-papa ou même un(e) scientifique chevronné(e).

Petits trésors historiques

Même les physiciens ou les ingénieurs d'expérience vont y trouver des petits trésors de connaissance qu'ils n'ont jamais appris pendant leur formation générale. En effet, l'histoire des sciences est si peu présente au sein des établissements d'enseignement que plusieurs expériences et raisonnements des savants du passé ne sont plus connus. Ces petits trésors de l'histoire facilitent pourtant beaucoup notre compréhension des phénomènes.

Pour les retrouver, l'auteur a dû lire abondamment les écrits originaux des savants qui ont marqué l'histoire de l'électricité. Il a également feuilleté plus de 80 000 pages de revues scientifiques du 19^e siècle afin d'y trouver des illustrations et des articles d'intérêt.

Le présent et le futur

Mais *Sur la route de l'électricité* ne porte pas uniquement sur l'histoire ancienne. Les développements technologiques récents y sont également à l'honneur. On y traite, entre autres, des micromiroirs électrostatiques au cœur des projecteurs numériques de nos cinémas maison, des piles à combustible et des voitures électriques, de la future propulsion magnétohydrodynamique des navires, des thermopiles alimentant en électricité nos sondes spatiales, des supraconducteurs, etc.

Des expériences plus accessibles

Lors de ses premières conférences sur l'histoire de l'électricité, l'auteur utilisait certains appareils scolaires pour démontrer les phénomènes. Ces appareils, quoique très utiles en classe, sont souvent encombrants et coûtent cher. Sans compter qu'avec le nombre d'appareils de démonstration qu'on retrouve normalement dans les écoles, la quantité d'expériences qu'on peut réaliser est plutôt limitée, souvent pour des raisons budgétaires.

Pour que l'apprentissage des phénomènes électriques et magnétiques de base soit plus accessible, il fallait trouver autre chose. C'est ainsi que l'auteur a été amené à développer une cinquantaine d'expériences maison sur l'électricité et le magnétisme, que l'on retrouve dans *Sur la route de l'électricité*.

Trois volumes

La réalisation d'un ouvrage comme *Sur la route de l'électricité* requiert un travail de plusieurs années à temps plein, chose que l'auteur doit faire à temps partiel. Aussi, afin de rendre disponible plus rapidement le matériel déjà finalisé, l'ouvrage a été divisé en trois volumes.

Le présent livre constitue le premier volume. On y traite du magnétisme des aimants et de l'électricité statique, de l'Antiquité à nos jours.

Le deuxième volume porte sur les piles électriques et les propriétés des courants électriques continus. On y parle, entre autres, des moteurs électriques, des télégraphes et de l'éclairage électrique, en partant de la fin du 18^e siècle jusqu'à nos jours.

Le troisième volume dévoile les secrets de l'induction électromagnétique (qui fait fonctionner nos centrales électriques), des ondes électromagnétiques et des électrons. La période couverte s'échelonne du début du 19^e siècle jusqu'à nos jours.

Des épisodes

Dans cette grande aventure, chaque découverte importante fait l'objet d'un épisode d'une à quatre pages. Les épisodes sont généralement divisés en deux sections. Dans la section *Un peu d'histoire*, on retrouve la description de la découverte, replacée dans son contexte historique. La section *Au laboratoire*, lorsqu'elle est présente, rassemble les informations nécessaires à la réalisation d'une expérience maison semblable à l'expérience historique à l'origine de la découverte.

L'approche modulaire, sous forme d'épisodes, rend la démarche du lecteur-expérimentateur plus progressive et permet de repérer facilement les diverses découvertes dans l'ensemble de l'ouvrage. De plus, les jeunes y trouvent une valorisation immédiate puisqu'ils peuvent rapidement réussir une expérience et comprendre une découverte.

Cinq niveaux

Chaque épisode est caractérisé par un niveau qui s'échelonne de 1 à 5, selon les critères suivants.

Niveau 1: Ce niveau s'adresse à toutes les personnes de 13 ans et plus. Les expériences qu'on y

retrouve sont simples et fondamentales. Elles sont idéales pour **éveiller la curiosité des enfants de 6 à 12 ans**, sous la supervision d'une personne responsable.

Niveau 2: Ce niveau s'adresse à toutes les personnes de 13 ans et plus qui veulent acquérir une **connaissance générale** des principales découvertes concernant l'électricité et le magnétisme. Les personnes qui ne s'orientent pas vers une carrière scientifique, mais qui veulent simplement améliorer leur culture en science ou satisfaire leur curiosité vont généralement s'arrêter à ce niveau.

Niveau 3: Ce niveau s'adresse à toutes les personnes de 13 ans et plus dont la curiosité scientifique est plus marquée. Ces personnes ne se dirigent pas nécessairement vers une carrière scientifique, mais elles veulent en savoir un peu plus.

Niveau 4: Les épisodes de ce niveau exigent des connaissances de base en algèbre ou peuvent contenir des raisonnements plus élaborés. Ce niveau s'adresse aux personnes de 15 ans et plus, qui se dirigent probablement ou sont déjà dans une carrière scientifique ou technique.

Niveau 5: Les épisodes de ce niveau s'adressent principalement à des étudiants en physique à l'université et à des physiciens.

Une progression en dents de scie

Pour éviter que *Sur la route de l'électricité* présente une histoire décousue et difficile à suivre, l'approche n'est pas purement chronologique. La progression des découvertes est plutôt présentée en « dents de scie ».

Chaque chapitre couvre les thèmes abordés en partant de leur découverte jusqu'à nos jours. Ainsi, on retrouve les derniers développements technologiques dans chacun des trois volumes du présent ouvrage.

Les références

Des références sont présentées à la fin de chaque épisode, couvrant le sujet traité dans l'épisode en question. La plupart de ces références concernent l'histoire des découvertes et décrivent des ouvrages anciens, car il y a très peu de livres d'histoire des sciences de nos jours. Plusieurs de ces références s'adressent donc à ceux ou à celles qui voudraient, un jour, pousser plus loin leur quête historique.

Se regrouper

L'auteur suggère que les jeunes se regroupent pour faire les expériences, car les échanges d'idées sont très bénéfiques à la démarche scientifique. Ce faisant, ils pourront également partager le plaisir et les dépenses pour le matériel.

Les savants en herbe peuvent se rencontrer dans un club-sciences à l'école ou se réunir entre amis à la maison. Les organismes de loisir scientifique et les camps de vacances pourraient également organiser des ateliers...

Table des matières

Le départ d'une grande aventure

Épisode 0-1	niveau 1	Deux pierres mystérieuses à l'origine de la science de l'électricité	16
-------------	----------	--	----

Chapitre 1 : Le magnétisme des aimants

Épisode 1-1	niveau 1	Un devin chinois découvre la boussole	20
Épisode 1-2	niveau 1	Les pierres d'aimant s'attirent ou se repoussent, selon leur orientation	22
Épisode 1-3	niveau 2	Le magnétisme est canalisé par le fer et détruit par la chaleur	24
Épisode 1-4	niveau 2	Des casques de fer augmentent la capacité de levage des aimants.....	26
Épisode 1-5	niveau 2	La Terre se comporte comme un gros aimant.....	28
Épisode 1-6	niveau 2	William Gilbert découvre pourquoi le fer est attiré par un aimant.....	30
Épisode 1-7	niveau 2	Des parcelles de fer font apparaître les « champs magnétiques ».....	32
Épisode 1-8	niveau 2	Des « fluides » et des « molécules » pour expliquer le magnétisme	34
Épisode 1-9	niveau 3	Une meilleure compréhension du phénomène de l'aimantation	36
Épisode 1-10	niveau 4	Coulomb mesure les forces entre les pôles magnétiques.....	38
Épisode 1-11	niveau 4	La balance à torsion magnétique, un instrument de mesure ingénieux.....	40
Épisode 1-12	niveau 3	Le vent solaire produit des cycles et des orages magnétiques	42
Épisode 1-13	niveau 5	Gauss mesure l'amplitude du champ magnétique terrestre.....	44
Épisode 1-14	niveaux 2 et 3	L'évolution des aimants artificiels.....	46
Épisode 1-15	niveau 2	Les applications des aimants permanents.....	49

Chapitre 2 : L'électricité statique

Épisode 2-1	niveau 1	Un tourniquet pour détecter la présence d'électricité statique	52
Épisode 2-2	niveau 1	Une machine électrostatique dévoile la répulsion électrique	54
Épisode 2-3	niveau 2	Conducteurs et isolants électriques	56
Épisode 2-4	niveau 1	Dufay découvre deux sortes d'électricités différentes	58
Épisode 2-5	niveau 2	Le frottement sépare les deux électricités présentes dans la matière.....	60
Épisode 2-6	niveau 2	Séparer les deux électricités d'un objet, sans y toucher.....	62
Épisode 2-7	niveau 2	L'électrophore produit de l'électricité statique à répétition	64
Épisode 2-8	niveau 2	Mettre l'électricité en bouteille ; le condensateur électrique	66
Épisode 2-9	niveau 2	Benjamin Franklin fait descendre l'électricité des nuages	68
Épisode 2-10	niveau 2	Une cage métallique isole des forces électriques	70
Épisode 2-11	niveau 4	La découverte de la loi régissant les forces électriques	72
Épisode 2-12	niveau 4	La répartition de l'électricité à la surface d'un objet conducteur.....	74
Épisode 2-13	niveau 3	Faraday découvre les propriétés diélectriques des isolants.....	76
Épisode 2-14	niveau 2	Les électroscopes, les électromètres et le cylindre de Faraday	78
Épisode 2-15	niveau 3	La cage de Faraday fonctionne dans les deux sens	80
Épisode 2-16	niveau 2	L'évolution des machines électrostatiques à frottement.....	82
Épisode 2-17	niveau 3	Les machines électrostatiques à influence	84
Épisode 2-18	niveau 2	La tension électrique et les étincelles.....	86
Épisode 2-19	niveau 3	Un « monte-charge » électrique produit des millions de volts	87
Épisode 2-20	niveau 3	Les accélérateurs électrostatiques Pelletron™ et leurs applications	89
Épisode 2-21	niveau 2	Moins de pollution grâce à l'électrostatique	91
Épisode 2-22	niveau 2	L'électrostatique donne naissance à la photocopie par xérophotographie	93
Épisode 2-23	niveau 2	La micro-électrostatique révolutionne la projection d'images.....	95
Épisode 2-24	niveau 3	La propulsion électrocinétique ; le phénomène des « lifters »	97

Références	99
------------------	----

Index	106
-------------	-----

Le départ d'une grande aventure

Le coup d'envoi de notre route de l'électricité remonte à 2600 ans dans le passé. Il a été effectué par un grand savant de la Grèce antique qui a décrit les propriétés mystérieuses de deux pierres : l'ambre et la pierre d'aimant. La pierre d'aimant est à l'origine de nos connaissances sur le magnétisme, qui fait l'objet du chapitre 1 de ce livre. L'ambre, de son côté, est à l'origine de nos connaissances sur l'électricité statique, qui fait l'objet du chapitre 2. L'électricité et le magnétisme ont longtemps été deux sciences séparées, jusqu'à ce que les savants du 19^e siècle découvrent que les phénomènes électriques et magnétiques sont intimement liés, comme nous le verrons dans le volume 2 de *Sur la route de l'électricité*.

Épisode 0-1

NIVEAU 1

DEUX PIERRES MYSTÉRIEUSES À L'ORIGINE DE LA SCIENCE DE L'ÉLECTRICITÉ

~ 600 av. J.-C.

Un peu d'histoire

La grande aventure scientifique que nous entreprenons commence il y a environ 2600 ans avec un homme du nom de **Thalès de Milet**, qui naquit en Grèce en l'an 640 avant Jésus-Christ.

Cet homme aux multiples facettes a été marchand, ingénieur, mathématicien et surtout philosophe. Il a beaucoup voyagé, en Égypte en particulier. On présume que c'est au cours de ses nombreux voyages qu'il a fait la connaissance de l'ambre et de la magnétite, deux corps aux pouvoirs bien mystérieux. Ces deux pierres avaient un pouvoir d'attraction et, selon les écrits qui ont été conservés, Thalès aurait été le premier à en parler.

L'électricité

Tu seras sans doute surpris d'apprendre que l'ambre (**figure 1**) est une résine végétale qui coulait sur l'écorce d'arbres gigantesques au temps des dinosaures. Après avoir séjourné des millions d'années sous terre et subi d'énormes pressions, ces mottes de résine ont durci et sont devenues des fossiles. Souvent, l'ambre contient des insectes qui y ont été emprisonnés, comme sur la **figure 1**, à partir de laquelle une deuxième photographie a été prise de plus près, focalisant sur l'insecte à l'intérieur.

Les Grecs de l'Antiquité fabriquaient de beaux bijoux avec l'ambre, dont le nom grec était **ēlektron**. Comme tu l'auras deviné, c'est là l'origine du mot «électricité».

Thalès nous raconte qu'après avoir frotté l'ambre contre une étoffe de laine, il pouvait attirer des substances légères, comme de petits bouts de paille ou des brins d'herbe. C'est cette simple observation de notre philosophe savant qui est à l'origine de la science de l'électricité. Nous découvrirons, en effet, que c'est la même force qui attire les bouts de paille et qui fait circuler le courant dans nos fils électriques. Étonnant, pas vrai ?



Morceau d'ambre avec un insecte emprisonné.



Pierre d'aimant (minerai d'oxyde de fer appelé «magnétite») qui attire deux trombones en fer, en raison de l'attraction magnétique.

Le magnétisme

L'autre pierre qu'a utilisée **Thalès** est la «pierre d'aimant» (**figure 2**) que l'on pouvait trouver non loin d'une ville d'Asie Mineure appelée Magnésie. Le mot «magnétique» vient justement du nom de cette ville. Cette pierre d'aimant est en fait un minerai d'oxyde de fer que l'on appelle «magnétite». Si l'ambre doit être frotté pour démontrer son pouvoir d'attraction, il en est autrement de la pierre d'aimant, qui, elle, a la propriété d'attirer des morceaux de fer sans avoir été frottée. Ainsi, cette autre observation a donné naissance à la science du magnétisme.

Comme nous le verrons plus loin sur notre «route» (dans le volume 2), ce n'est qu'au 19^e siècle que l'homme découvrira le lien étroit qui existe entre le magnétisme et l'électricité. Mais n'anticipons pas trop et revenons à l'Antiquité.

L'aimantation par contact

Au temps de **Thalès**, on avait également observé que ce pouvoir d'attraction de la pierre d'aimant pouvait être communiqué à des clous en fer lorsque ceux-ci étaient frottés suffisamment longtemps sur la pierre. Ces morceaux de fer pouvaient, à leur tour, attirer d'autres petits morceaux de fer même lorsqu'ils n'étaient plus en contact avec la pierre d'aimant. C'est le phénomène de l'aimantation par contact.

Deux bouts actifs

Par ailleurs, toute personne moins observatrice, ayant essayé d'attirer un morceau de fer avec une pierre de magnétite, réalise, après quelques essais, que la force d'attraction de la pierre est concentrée en deux régions diamétralement opposées sur la pierre. C'est comme si une pierre de magnétite avait deux «bouts actifs» qu'on appellera plus tard les deux «pôles magnétiques» d'un aimant (voir l'épisode 1-2).

Au laboratoire

L'attraction électrique

Depuis **Thalès**, on a découvert que d'autres substances, à part l'ambre, pouvaient manifester une force d'attraction électrique après avoir été frottées.

Parmi ces substances, le plastique, un produit du 20^e siècle, est particulièrement adapté pour notre expérience. Une règle ou un peigne en plastique feront très bien l'affaire.

Frotte à plusieurs reprises le peigne dans tes cheveux. Le peigne et tes cheveux doivent être secs pour que ça fonctionne bien. Tu pourras ensuite attirer, avec le peigne, des petits objets légers comme des bouts de papier hygiénique (**figure 3**) ou encore des petits morceaux de liège que tu auras détachés d'un bouchon. Des petits morceaux d'un tampon à récurer en caoutchouc mousse feront également l'affaire.

Tu peux aussi utiliser une règle de plastique que tu frotteras vigoureusement, des deux côtés, contre un tampon à récurer en caoutchouc mousse bien sec.

Comme nous le verrons et le comprendrons plus loin, l'humidité nuit à la bonne marche de ce genre d'expériences.

L'attraction magnétique

Pour expérimenter l'attraction magnétique, il faudra te procurer des petits aimants. Tu les trouveras dans des boutiques qui vendent du matériel pour le bricolage en électronique, ou encore dans une bonne quincaillerie.

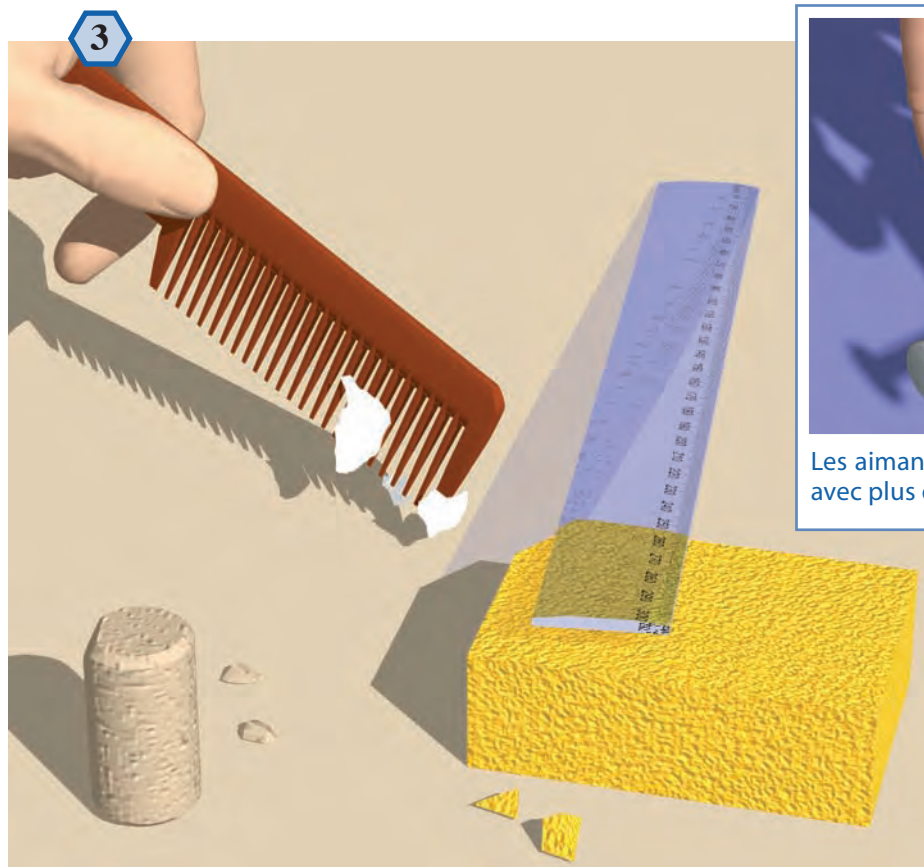
Les aimants qui conviennent le mieux, pour l'ensemble des expériences de ce livre, sont en ferrite et ont la forme d'un beignet aplati de 2,5 cm de diamètre environ. Utilise une pile de ces petits aimants pour attirer un clou en fer (**figure 4**). Essaie d'attirer d'autres matériaux, comme du papier

Matériel requis

- un peigne en plastique
- une règle de plastique
- un tampon à récurer en caoutchouc mousse
- quelques petits aimants plats en ferrite, de 2,5 cm de diamètre environ
- un bouchon de liège
- du papier hygiénique
- du papier d'aluminium
- un clou en fer

d'aluminium, du plastique, du bois, des pièces de monnaie, etc.

Tu constateras que certaines pièces de monnaie sont attirées. C'est la présence de nickel dans ces pièces qui en est la cause. Le nickel, qui se comporte comme le fer, n'était pas connu dans l'Antiquité.



Les aimants qu'on fabrique aujourd'hui attirent le fer avec plus de force qu'une pierre de magnétite.

Les matières plastiques, qui n'existaient pas du temps de Thalès, se comportent comme l'ambre et sont faciles à trouver tout autour de nous. Un peigne ou une règle de plastique que l'on frotte dans ses cheveux, lorsque ceux-ci sont bien secs, peuvent facilement attirer des objets légers comme des petits morceaux de papier hygiénique, de liège ou encore de caoutchouc mousse.

Pour en savoir plus

- *L'ambre, Miel de Fortune et Mémoire de Vie*, Eric GAEIRNAERT, Du Piat, Monistrol sur Loire, France, 2002.
- *Amber, the natural time capsule*, Andrew ROSS, The National History Museum, London, 1998.

CHAPITRE 1

Le magnétisme des aimants

Après les Grecs, ce sont les Chinois qui prennent la vedette dans la science du magnétisme, en inventant la boussole aux environs de 300 av. J.-C. Cette invention a eu des répercussions considérables sur la navigation, en permettant aux grands explorateurs de s'aventurer beaucoup plus loin, sans perdre le nord.

Au Moyen-Âge, Pierre de Maricourt enseigne comment localiser deux régions bien spéciales dans les pierres d'aimant. Il appelle ces deux régions, diamétralement opposées, le pôle Nord magnétique et le pôle Sud magnétique de la pierre. Il démontre par la suite que les pôles magnétiques semblables se repoussent et que les pôles magnétiques contraires s'attirent.

William Gilbert, le « Galilée du magnétisme », entre en jeu à la fin du 16^e siècle. Ce génial médecin anglais démontre que la Terre est en fait un gros aimant et que c'est la raison pour laquelle elle aligne les aiguilles aimantées des boussoles. Il introduit également le concept de champ de force magnétique, popularisé en 1644 lorsque Descartes publie les dessins des configurations prises par des parcelles de fer répandues autour des aimants.

Il faudra attendre Charles-Augustin Coulomb avant que d'autres découvertes importantes soient effectuées sur le magnétisme, en 1777. Ce grand savant détermine d'abord la meilleure manière d'aimanter des barreaux d'acier, afin de fabriquer de meilleures boussoles pour les navires. Il invente ensuite un instrument de mesure ingénieux, la balance à torsion, qu'il utilise pour mesurer les forces entre les pôles magnétiques des barreaux aimantés. Ses expériences l'amènent à déduire la présence de « molécules magnétiques » à l'intérieur des aimants et à mieux comprendre le phénomène de l'aimantation. Il construit également un instrument très sensible pour étudier les « affolements » occasionnels de l'aiguille des boussoles, lors des « orages magnétiques », qu'on associera plus tard aux gigantesques explosions à la surface du Soleil.

En ce qui concerne le champ de force magnétique de la Terre, Gauss conçoit, en 1832, une méthode de mesure très précise qui permet de déterminer son intensité à différents endroits de la planète. Il ouvre ainsi la voie à la science du géomagnétisme.

La fabrication d'aimants artificiels avant 1820 consistait à aimanter des barreaux d'acier en les frottant avec des pierres d'aimant. Après que Oersted a découvert les effets magnétiques des courants électriques, en 1820, les ingénieurs vont aimanter les barreaux d'acier avec du courant électrique.

Ce n'est qu'au 20^e siècle qu'on verra apparaître des alliages plus élaborés que l'acier pour fabriquer des aimants artificiels. C'est ainsi que vont naître les aimants en alnico dans les années 1930, les aimants en ferrite dans les années 1950, et les aimants superpuissants au néodyme dans les années 1980. Ces derniers sont en train de révolutionner littéralement le monde des moteurs électriques.

Sans plus tarder, pénétrons dans cet univers quasi magique des aimants.

~ 300 av. J.-C.

Un peu d'histoire

Un contexte bien particulier a rendu possible une découverte qui devait s'avérer capitale pour la navigation. C'est, en effet, grâce à une tradition chinoise antique de divination que la boussole a vu le jour en Chine environ 300 ans avant Jésus-Christ.

Une cuiller qui prédit l'avenir

Une des techniques utilisées à l'époque pour prédire l'avenir consistait à mettre une cuiller en équilibre sur une plaque de bronze bien polie et à la faire tourner, alors que plusieurs symboles étaient disposés tout autour. Lorsque la cuiller arrêta, son manche pointait vers un symbole particulier et le devin en tirait une inspiration pour prédire l'avenir des personnes qui le consultaient. C'est une cuiller semblable, taillée dans une pierre de magnétite, qui semble avoir constitué la première boussole (figure 1).

Un devin inspiré

Ainsi, il est probable qu'un jour un devin, ayant observé le pouvoir mystérieux d'une pierre de magnétite, ait eu l'idée d'y tailler une cuiller afin de bénéficier, lors de ses séances de divination, de l'esprit magique qui semblait habiter cette pierre. Comme nous l'avons vu à l'épisode 0-1, deux «bouts» de la pierre de magnétite sont plus actifs. Il est donc logique de penser que notre devin chinois ait taillé sa cuiller de manière à ce que ses bouts correspondent aux «bouts actifs» de la pierre.

En expérimentant avec sa cuiller de magnétite, il a sûrement été très surpris de réaliser qu'elle s'alignait d'elle-même, toujours dans la même direction nord-sud. Cet alignement se produisant d'autant plus facilement que la plaque de bronze et la cuiller sont bien polies, de manière à n'offrir aucune résistance à la rotation de la cuiller.

De toute manière, sache que c'est vraisemblablement en expérimentant de la sorte, avec une cuiller de magnétite,



Reproduction d'une boussole chinoise antique de la dynastie de Han (206 av. J.-C. – 220 apr. J.-C.) selon un modèle conservé au Musée de l'Histoire de la Chine à Pékin (Beijing). Cette reproduction est fabriquée par l'«Institut central de recherche sur le fer et l'acier», à Pékin, et elle pointe vers le Sud. Elle est vendue pour des fins éducatives et comme souvenir.

que les Chinois ont, les premiers, observé les propriétés d'orientation de la pierre d'aimant. On retrouve des allusions à cette «cuiller magique» dans la littérature chinoise datant de la période «Zhan Kuo» (480 à 221 avant Jésus-Christ).

Des aiguilles flottantes

Plus tard, les Chinois ont fait flotter une pierre de magnétite dans un bol et la laissaient s'orienter. Ensuite ils ont aimanté, par contact, une aiguille en fer qu'ils plaçaient dans une paille et qu'ils faisaient flotter, dans un bol rempli d'eau.

Les Arabes et les Italiens

Ce sont les Arabes qui transmirent cette connaissance en Europe au 12^e siècle. Ce n'est qu'au début du 14^e siècle que les Italiens ont introduit la «**boussole à pivot**» qu'on utilise encore de nos jours.

Impact sur la navigation

Tu peux imaginer que cette invention a eu des répercussions considérables sur la navigation, car les marins n'avaient

plus peur de «perdre le nord» lorsqu'ils s'éloignaient des côtes, et ce, même si le temps était nuageux, le soleil et les étoiles ne pouvant alors plus les aider à s'orienter. Ainsi, le commerce maritime s'est beaucoup développé et les grands explorateurs ont pu découvrir d'autres continents.

Déclinaison magnétique

Lors de son voyage au cours duquel il a découvert l'Amérique, **Christophe Colomb** a observé que l'aiguille de la boussole ne pointait pas toujours précisément vers le nord géographique. En effet, sur de longs trajets, l'aiguille de la boussole change progressivement son angle avec la direction de l'étoile polaire.

En fait, le pôle magnétique de la Terre situé au nord est à environ 1 000 km du pôle Nord géographique, dans le Grand Nord canadien, et il se déplace d'environ 40 km/an en direction de la Russie.

On appelle «**déclinaison magnétique**» l'angle entre la direction du nord géographique et celle de la boussole.

Au laboratoire

Pour reconstituer la boussole historique de notre devin chinois, il te suffira de reprendre les petits aimants que nous avons utilisés dans notre expérience précédente (**épisode 0-1**) sur la force d'attraction magnétique.

Place cinq ou six aimants dans une cuiller à thé métallique, tel qu'illustré sur la **figure 2**. Ensuite, tu déposeras un petit miroir de toilette bien à l'horizontale sur une table. Il est important de bien nettoyer le miroir et la cuiller avec un liquide commercial pour le nettoyage des vitres afin que la cuiller glisse le mieux possible sur le miroir. Laisse la magie de la nature faire son œuvre et mets une petite étiquette (lettre N ou S) à chaque bout de ta pile d'aimants pour identifier le côté qui fait face au nord (N) et le côté qui fait face au sud (S).

Mais cette boussole « historique » est un peu encombrante et pas tellement appropriée pour les autres expériences,

où nous aurons besoin d'une boussole plus petite. Cette boussole plus « pratique » est illustrée sur la **figure 3**. Pour la réaliser, il te faudra d'abord aimanter par contact deux aiguilles à coudre de quatre centimètres environ. Prends donc ta pile d'aimants et frotte la tête de tes aiguilles, pendant une dizaine de secondes, sur un des bouts de ta pile, disons celui que tu viens d'étiqueter avec un N. Frotte ensuite la pointe des aiguilles sur l'autre bout de ta pile d'aimants.

Ensuite, utilise un couvercle de plastique de cinq à six centimètres au centre duquel tu inséreras une punaise métallique à tête plate.

Pour compléter la boussole, découpe une petite rondelle de deux centimètres dans un plateau de polystyrène, tel que ceux que l'on utilise pour l'emballage des morceaux de viande. Perce un trou de quatre millimètres au centre, avec un clou, et insère les aiguilles dans la rondelle, tel qu'illustré. Mets un peu

Matériel requis

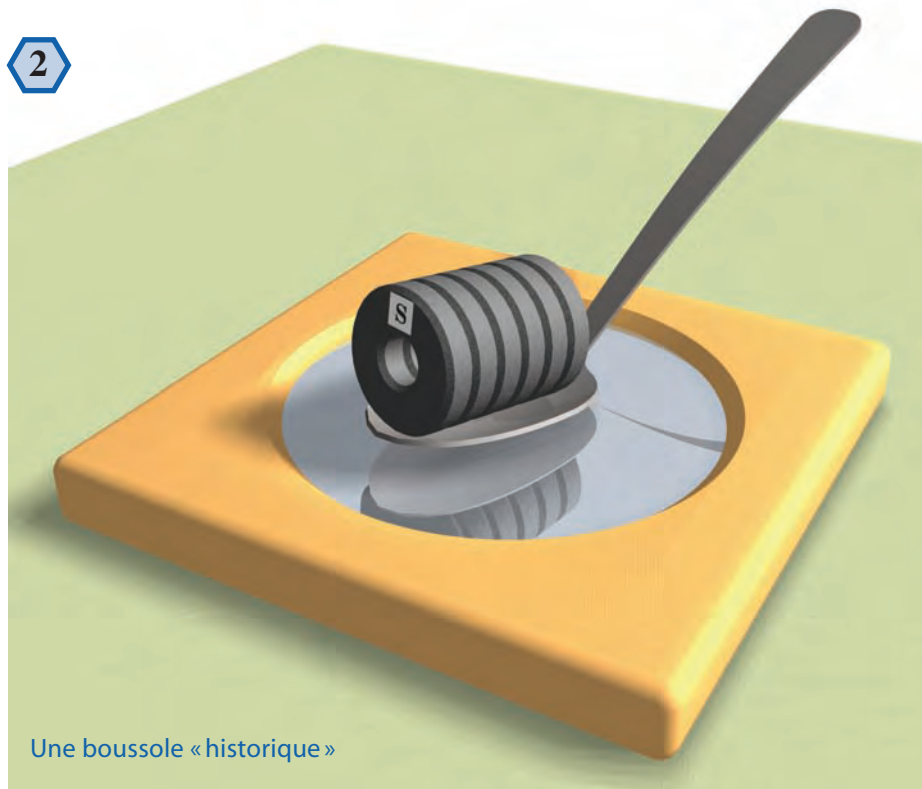
BOUSSOLE HISTORIQUE

- un petit miroir de toilette
- une cuiller à thé métallique
- 6 petits aimants plats de 2,5 cm de diamètre environ

BOUSSOLE PRATIQUE

- un couvercle de plastique de 5 ou 6 cm
- une rondelle de polystyrène de 2 cm
- 2 aiguilles de couturière de 4 cm
- une punaise métallique à tête plate
- 6 petits aimants plats

2



Une boussole « historique »

3



Une boussole « pratique »

d'eau dans le couvercle et fais flotter ta rondelle avec les aiguilles. La punaise empêchera la rondelle d'aller se coller sur le bord du couvercle. Finalement, tu identifieras le côté nord par un N et le côté sud par un S.

Afin que ta boussole indique bien le nord, il faudra t'assurer qu'elle n'est pas à proximité d'un objet en fer. Il est possible que l'expérience ne fonctionne pas de façon optimale si tu la fais dans un édifice en béton armé, car il y a beaucoup de fer dans un tel édifice. Éloigne également les aimants de ta boussole, car les aimants interagissent entre eux comme nous le verrons à l'**épisode qui suit**.

Pour en savoir plus

- *La science chinoise et l'Occident*, par Joseph NEEDHAM, coll. Points Sciences, Éditions du Seuil, Paris, 1973.
- *The Riddle of the Compass*, par Amir D. ACZEL, Harcourt Inc., New York, 2001.
- « Le Canada perd le nord », Aurélie DELÉGLISE, revue *Québec Science*, mai 2002, p. 9 et 10.
- *Model Si Nan of Han Dynasty*, dépliant descriptif accompagnant la boussole de la figure 1.

En l'an 1269

Un peu d'histoire

Au 12^e siècle, la pénétration de la boussole en Europe suscita beaucoup d'intérêt. C'est ce qui incita le Français **Pierre de Maricourt** (figure 1) à étudier le magnétisme beaucoup plus en détail. Cet érudit médiéval était vraiment en avance sur son temps.

Les pôles magnétiques

D'abord, il définit, dans une lettre qu'il écrit en 1269, les pôles magnétiques d'une pierre d'aimant :

Tu dois savoir que cette pierre porte en elle la ressemblance du ciel... car dans le ciel il y a deux points remarquables autour desquels se meut la sphère céleste comme autour d'un axe, l'un appelé pôle Nord et l'autre pôle Sud. De même dans cette pierre tu trouveras deux points dont l'un est appelé pôle Nord et l'autre pôle Sud.

Pour les trouver, tu peux employer divers moyens. L'un consiste à donner à la pierre une forme ronde... Ensuite tu poses une aiguille ou un morceau de fer allongé, équilibré comme une aiguille et, suivant la direction que prend le fer, on marque une ligne divisant la pierre en deux [figure 2]. On pose ensuite l'aiguille en un autre endroit de la pierre, et en cet endroit on marque de même une nouvelle ligne. Et l'on peut faire cela en plusieurs endroits : toutes ces lignes concourront en deux points comme tous les cercles du monde, qu'on appelle azimuts, concourent vers les deux pôles opposés de l'univers.

Sachant reconnaître les deux pôles de cette pierre, tu vas apprendre lequel est pôle Nord et lequel est pôle Sud. Prends un vase en bois rond comme un bol ou un compotier et mets-y la pierre de manière que ses deux pôles soient à la même distance du bord. Mets alors ce vase, avec la pierre dedans, dans un autre grand vase plein d'eau, de sorte que la pierre soit dans le premier comme un navigateur



Gravure représentant vraisemblablement Pierre de Maricourt (Musée de la civilisation, collection du Séminaire de Québec. Lapis Polaris, Magnes. Jan Van der Straet, dit Stradanus. Pierre Soulard, photographe. N° 1993.34483).

*dans un navire et le premier [vase] dans le second, très grand, comme un navire flottant sur un fleuve ou sur la mer... La pierre ainsi posée fait tourner le premier vase jusqu'à ce que son pôle Nord soit dans la direction du pôle Nord du ciel et son pôle Sud vers le pôle Sud du ciel...**

L'interaction entre les pôles

Ensuite, il décrit comment interagissent les pôles magnétiques. Pour ce faire, il fait flotter une pierre d'aimant sphérique dans un bol en bois (comme décrit plus haut) et il tient une autre pierre dans sa main.

Notre savant français fait observer que le pôle Nord de la pierre d'aimant qu'il tient repousse le pôle Nord de la pierre qui flotte. De même, le pôle Sud de la pierre qu'il tient repousse le pôle Sud de la pierre qui flotte.

Par contre, si on approche le pôle Nord d'une pierre d'aimant du pôle Sud d'une autre pierre, ces deux extrémités s'attirent.

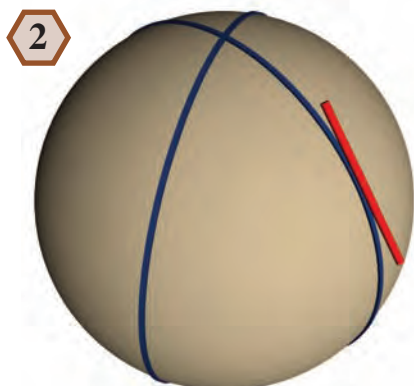
La grande loi qu'il nous lègue est donc :

Deux pôles magnétiques semblables se repoussent et deux pôles magnétiques contraires s'attirent.

Les aiguilles d'une boussole interagissent entre elles de la même manière que les pierres d'aimant.

Deux pôles inséparables

Pierre de Maricourt nous apprend également qu'il est impossible de séparer les deux pôles. Si on casse une aiguille magnétisée en deux, les deux pôles apparaissent dans chacun des deux morceaux (voir la figure 4).



Localisation des pôles magnétiques

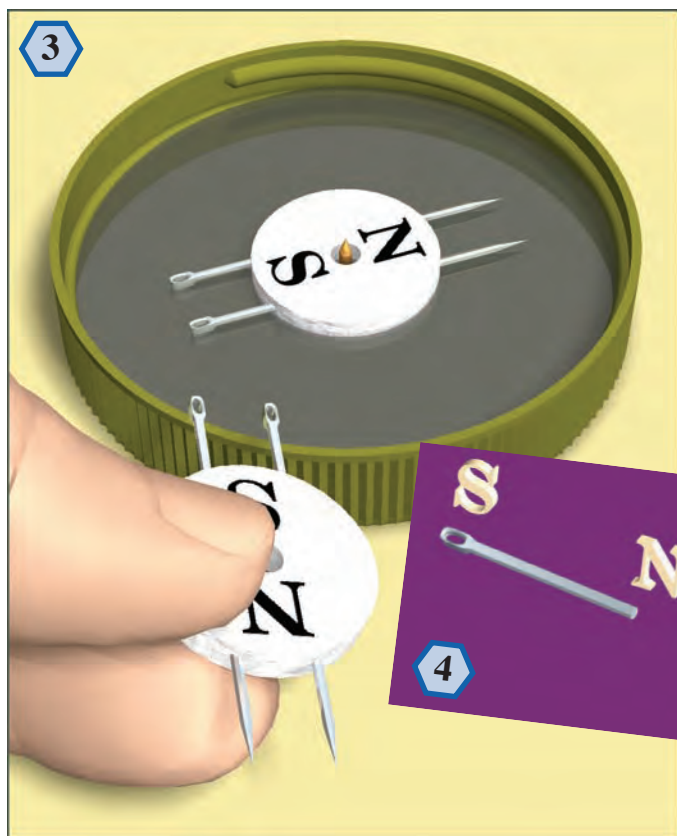
Au laboratoire

Marchons donc sur les pas de **Pierre de Maricourt** et reconstituons, à notre manière, les expériences qu'il a faites. Pour ce faire, nous aurons besoin de nos boussoles de l'**épisode précédent**.

Il te faudra d'abord fabriquer un deuxième ensemble «rondelle de polystyrène – aiguilles aimantées». L'aimantation des aiguilles se fait selon la procédure exposée à l'épisode 1-1. Laisse ton ensemble s'aligner dans la direction nord-sud, en le substituant au premier ensemble que tu as déjà fabriqué pour la «boussole pratique» et en le faisant flotter. Marque avec la lettre **N** le côté qui indique le nord et avec un **S** le côté qui indique le sud.

Nos aiguilles de boussole sont devenues elles-mêmes des aimants lorsque nous les avons frottées sur les aimants plats. De plus, nous avons localisé et identifié leurs pôles magnétiques, selon la définition que nous a donnée Pierre de Maricourt.

Il te suffira maintenant d'approcher le pôle Sud de ton deuxième ensemble d'aiguilles aimantées près du pôle Sud de l'ensemble de ta boussole (voir la **figure 3**) et d'observer, par toi-même, ce qui se passe.



Interaction entre les pôles des aiguilles d'une boussole

Matériel requis

- les deux boussoles que nous avons fabriquées à l'épisode 1-1
- un deuxième ensemble d'aiguilles aimantées, fixées dans une rondelle de polystyrène, comme celui de la « boussole pratique »
- une bobine de fil à coudre
- un crayon à colorier

Fais la même chose en approchant un pôle Nord d'un pôle Nord et finalement en approchant les pôles contraires Nord et Sud.

Pour vérifier que les deux pôles magnétiques d'une aiguille aimantée ne peuvent être séparés, retire une aiguille aimantée de ton deuxième ensemble. Utilise ensuite une pince coupante pour sectionner l'aiguille et présente chacune des extrémités des moitiés d'aiguille à l'un des pôles de ta boussole. Tu pourras ainsi vérifier, en utilisant la loi d'interaction des pôles magnétiques, que des pôles contraires apparaissent là où nous avons coupé l'aiguille en deux (**figure 4**). Il semble impossible d'isoler un pôle Nord ou un pôle Sud ; ils apparaissent toujours en paire.



Répulsion entre les pôles semblables des aimants

Tu peux faire une autre expérience encore plus spectaculaire pour vérifier les lois d'attraction et de répulsion des pôles. Utilise deux piles d'aimants plats dont tu identifieras les pôles Nord et Sud, comme dans le **précédent épisode**, avec la « boussole historique ». Un crayon à colorier et une bobine de fil à coudre maintiendront les aimants en lévitation (**figure 5**).

* Cet extrait en français est tiré du livre de Edmond BAUER, *L'électromagnétisme hier et aujourd'hui*, chez Albin Michel, Paris, 1949. Il existe une édition anglaise de la lettre de Pierre de Maricourt (dit Petrus Perigrinus) : *The Letter of Petrus Perigrinus on the magnet*, par le frère Arnold, McGraw Publishing Company, New York, 1904. Édition plus récente en tant que chapitre dans le livre *The Free-Energy Device Handbook, a compilation of patents & reports*, compilé par David Hatcher Childress, chez Adventures Unlimited Press, Stelle, Illinois, 1995.

En l'an 1589

Un peu d'histoire

En 1589 paraît un livre très intéressant intitulé *La magie de la nature*. Ce livre est rempli de « trucs de magie » que l'on peut réaliser simplement en utilisant les lois de la nature. Les lentilles qui forment des images agrandies, l'électricité et le magnétisme qui présentent des forces mystérieuses, voilà les sujets dont traite ce livre écrit par **Giambattista Della Porta**, un Italien vivant à Naples.

Le fer canalise le magnétisme

En ce qui concerne le magnétisme, **Porta** nous parle dans ce livre de deux découvertes importantes.

La première découverte concerne le détournement des forces magnétiques par une plaque de fer. Porta constate en effet qu'en appliquant une plaque de fer sur un pôle magnétique d'une pierre d'aimant, la force d'attraction du pôle de la pierre se trouvait détournée vers les bords de la plaque, alors qu'on croyait que la vertu de l'aimant ne pouvait être détournée par aucun corps.

Tout se passe comme si le fer canalisait la force magnétique.

Quelques années plus tard, **William Gilbert**, un homme de sciences anglais d'envergure, étudie ce phénomène en détail. Il relate les résultats de ses expériences dans son livre *De Magnete*, paru en 1600. La **figure 1**, ci-dessous, est tirée de ce livre. **Gilbert** place une plaque de fer **A**, en forme de disque, sur l'un des deux pôles **C** d'une pierre de magnétite, taillée en forme de sphère (voir la **figure 1**). Il observe alors une diminution considérable de la force qu'exerce normalement le pôle **C** sur l'aiguille **B** d'une boussole, située en face de ce pôle. Cette diminution de la force lui est révélée par la lenteur avec laquelle l'aiguille s'oriente, lorsqu'on la dévie de sa position d'équilibre.

La chaleur détruit l'aimantation

L'autre découverte, rapportée par **Porta** dans son livre, concerne la destruction de l'aimantation par le feu. Il observe qu'en chauffant une pierre d'aimant jusqu'à ce qu'elle devienne rouge, son pouvoir d'attraction pour le fer disparaît, même

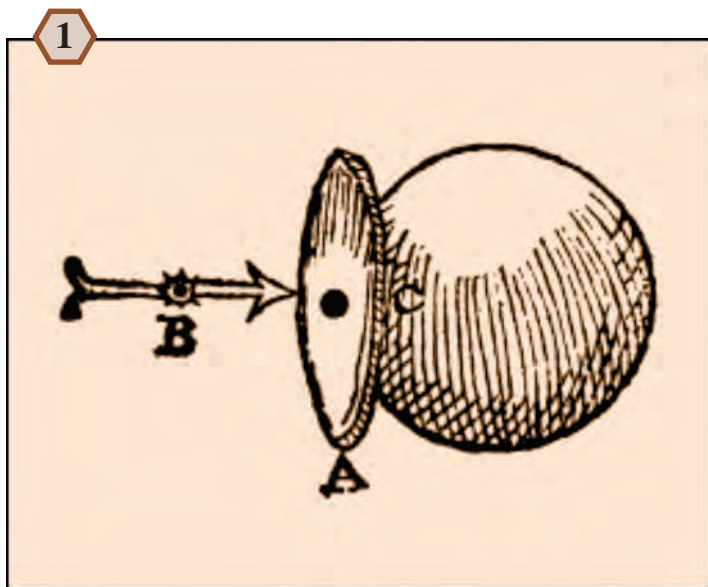
après l'avoir refroidie. Il en est de même pour un morceau de fer qui aurait été aimanté par contact ; lorsqu'on le chauffe suffisamment fort et longtemps, il perd son aimantation (**figure 2**).

Toutefois, si le refroidissement se fait très lentement et que la pierre d'aimant ou le morceau de fer ne bougent pas pendant ce temps, il apparaîtra, de nouveau, une aimantation dans la direction nord-sud. Le nouveau pôle Nord magnétique fera face au nord et le nouveau pôle Sud magnétique fera face au sud.

Une roche volcanique

Nous savons aujourd'hui que la magnétite est une roche (composée principalement d'oxyde de fer) provenant de la lave volcanique qui s'est refroidie lentement, donnant ainsi naissance à une aimantation de la magnétite dans la direction nord-sud.

Cette aimantation de la magnétite est beaucoup plus forte que celle du fer qui aurait été chauffé et refroidi lentement.



Expérience de William Gilbert montrant qu'une plaque de fer **A**, placée sur l'un des pôles **C** d'une pierre de magnétite, diminue de beaucoup l'influence de ce pôle sur l'aiguille **B** d'une boussole.



En chauffant au rouge un morceau de fer aimanté, ce forgeron de la Renaissance lui enlève sa force d'attraction magnétique.

Au laboratoire

Nous allons, nous-mêmes, faire notre apprentissage de la « magie de la nature » en faisant quelques expériences sur le pouvoir d'attraction des aimants, à travers différents matériaux.

Il s'agira, dans un premier temps, d'essayer d'attirer une petite vis en fer à l'aide de l'un des pôles d'une pile d'aimants plats, mais en interposant différents matériaux entre la vis et la pile d'aimants. Ces matériaux devront avoir quelques millimètres d'épaisseur tout au plus.

Utilise, à tour de rôle, un moule à gâteau en aluminium (assure-toi qu'il est bien en aluminium en vérifiant que l'aimant n'y adhère pas), une petite assiette en céramique, un couvercle

de plastique et un carré de carton. Tu constateras que la force d'attraction magnétique traverse tous ces matériaux (**figure 3**).

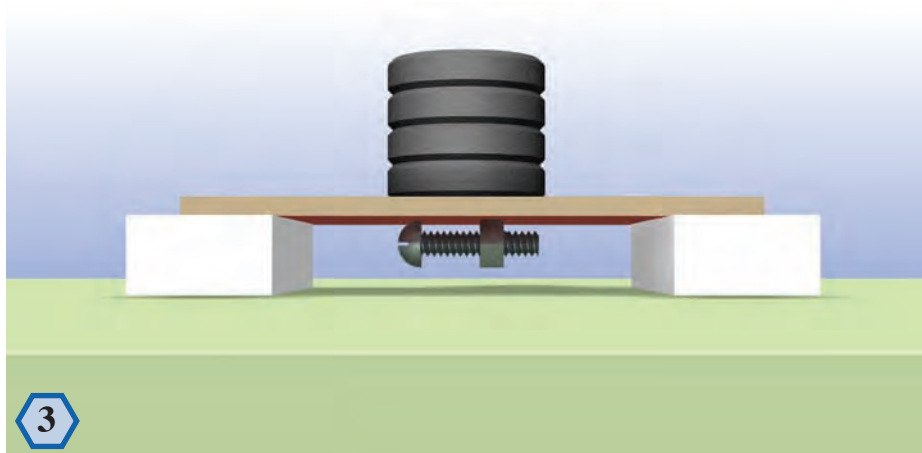
Maintenant, interpose, entre la vis et la pile d'aimants, l'un des battants en fer d'une vieille peinture de porte (**figure 4**). Ce battant de peinture fera office de plaque de fer. En plaçant la pile d'aimants juste au-dessus de la vis, tu vas réaliser que la vis n'est pas soulevée !

Ta vis sera bien attirée, toutefois, si tu lui présentes la bordure du battant de peinture, comme sur la **figure 5**. Tout se passe comme si la force magnétique de l'aimant était déviée et canalisée, par une plaque de fer, vers les bords de la plaque.

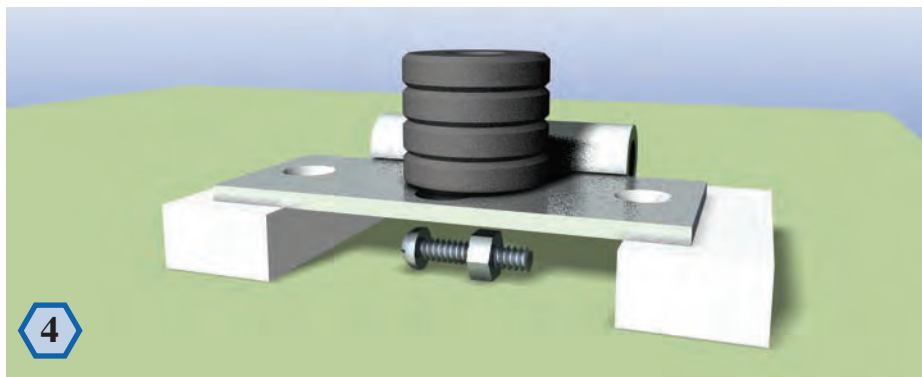
C'est à l'**épisode 1-9** que nous comprendrons mieux ce qui se passe.

Matériel requis

- 4 aimants plats de 2,5 cm de diamètre environ
- une vieille peinture de porte de maison en fer
- un moule à gâteau en aluminium
- un couvercle de plastique
- une petite assiette en céramique
- un carré de carton de 10 cm
- une vis en fer de 2 à 3 cm avec son écrou
- 2 gommes à effacer

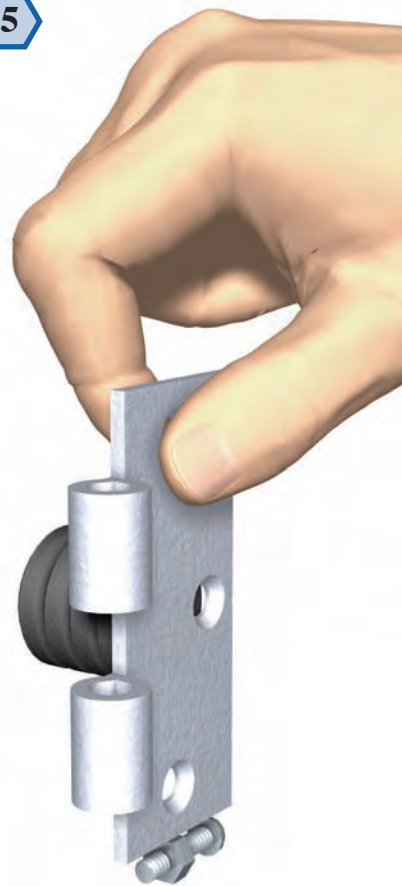


La force d'attraction de l'aimant traverse le carton et fait coller la vis à sa surface inférieure. Il en est de même pour les autres matériaux, sauf pour le fer.



Une plaque de fer (battant de peinture de porte) détourne les forces magnétiques de l'aimant vers ses bords et empêche l'attraction de la vis sous la plaque.

5



La vis est attirée par la bordure de la plaque de fer ; elle y adhère sans problème.

Pour en savoir plus

- *De Magnete*, William GILBERT, édition originale en latin, Londres, 1600. Reproduction anglaise : Dover, New York, 1958.

En l'an 1600

Un peu d'histoire

Le fer ne fait pas que dévier les forces magnétiques ; il peut également les concentrer et les amplifier, ce qui permet de soulever des objets en fer plus lourds.

C'est ce que nous rapporte **William Gilbert**, médecin à la cour d'Angleterre et pionnier du magnétisme, dans son livre *De Magnete* publié en 1600.

Des casques de fer

Ce grand savant nous apprend qu'en fixant des « casques en fer » sur les pôles d'une pierre d'aimant, cette dernière peut soulever des objets en fer plus lourds que sans ces casques ou armatures.

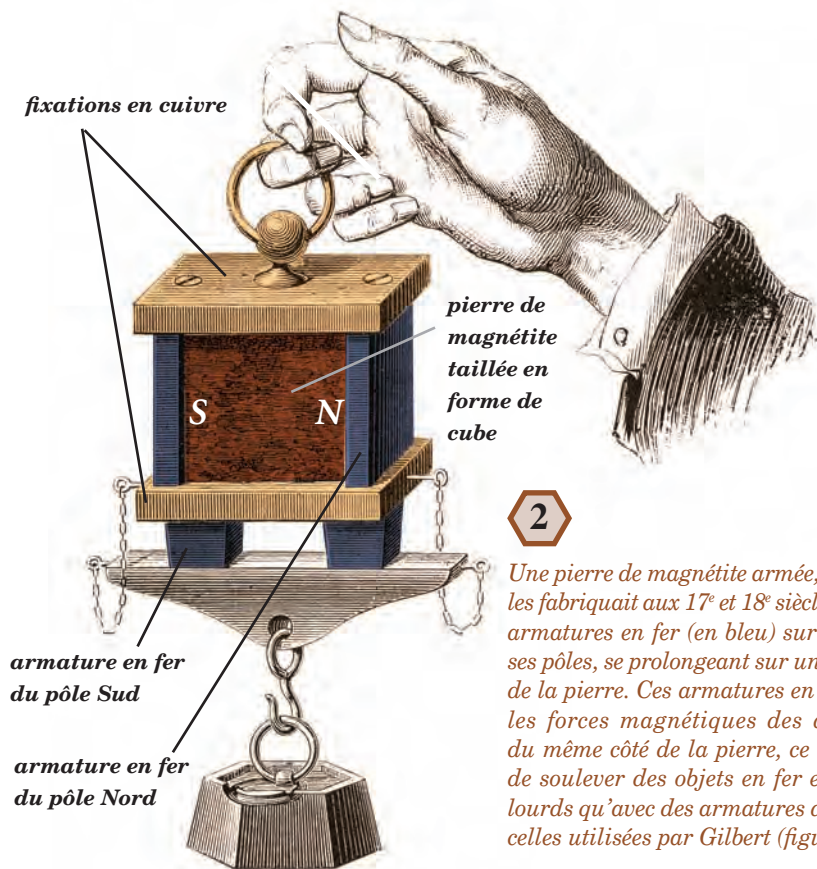
Il décrit également une autre expérience avec trois pierres d'aimant, ainsi armées de casques de fer. Lorsqu'on réunit ces pierres par leurs pôles,

une pierre peut soulever les deux autres (voir la **figure 1**). Ceci est impensable sans armatures de fer, car une pierre d'aimant « nue » n'arrive pas à soulever une autre pierre « nue ».

Utiliser les deux pôles

Plus tard, aux 17^e et 18^e siècles, les scientifiques ont construit des pierres d'aimant armées capables de soulever des objets en fer encore plus lourds. Sachant que les forces magnétiques émanent principalement des deux pôles d'une pierre d'aimant, ils ont pensé dévier ces forces du même côté de la pierre, afin de pouvoir utiliser les deux pôles, ensemble, pour soulever les objets en fer.

La **figure 2** nous montre ce genre de pierre armée. Des fixations en cuivre maintiennent les deux armatures en fer en contact avec les pôles magnétiques de la pierre.



2

Une pierre de magnétite armée, telle qu'on les fabriquait aux 17^e et 18^e siècles, avec des armatures en fer (en bleu) sur chacun de ses pôles, se prolongeant sur un même côté de la pierre. Ces armatures en fer dévient les forces magnétiques des deux pôles du même côté de la pierre, ce qui permet de soulever des objets en fer encore plus lourds qu'avec des armatures du genre de celles utilisées par Gilbert (figure 1).

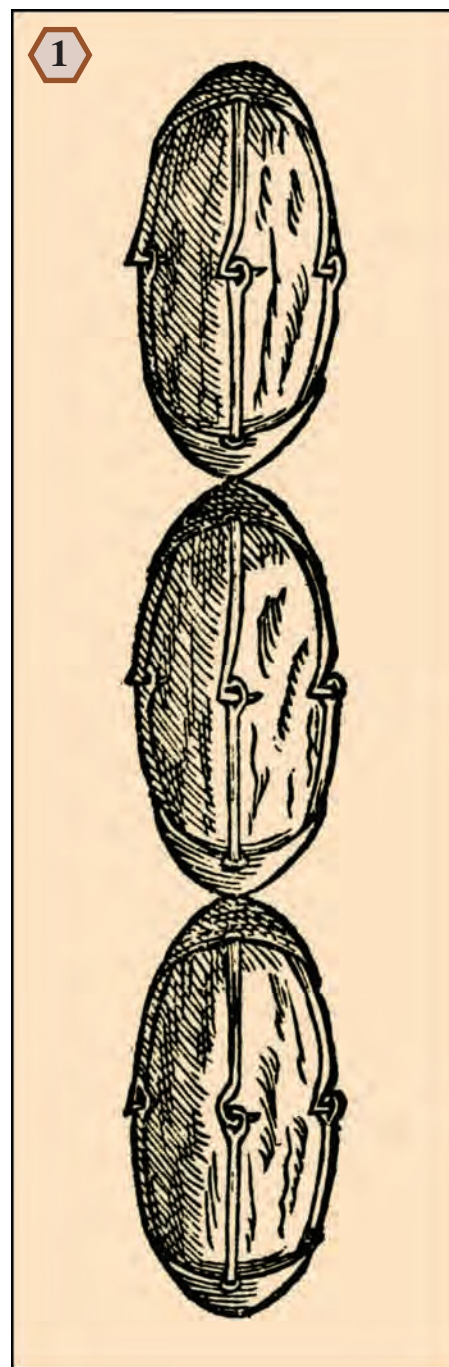


Illustration tirée du livre de Gilbert, intitulé *De Magnete* (publié en 1600), montrant trois pierres d'aimant (magnétite) armées se soulevant l'une l'autre par leurs pôles. Les armatures de fer, sur les pôles, augmentent la force d'attraction entre les pierres et permettent à une pierre d'aimant d'en soulever deux ou trois autres.

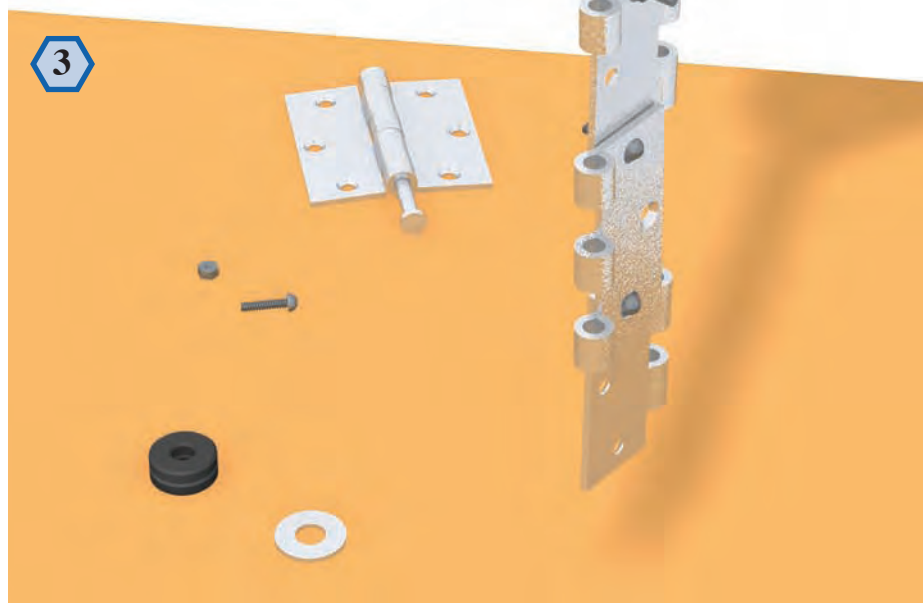
Au laboratoire

L'expérience illustrée sur la **figure 3** est l'une des plus impressionnantes du présent livre.

Alors que **Gilbert** nous dit qu'une pierre d'aimant peut soulever un objet en fer trois ou quatre fois plus lourd, lorsqu'on recouvre le pôle utilisé avec un morceau de fer, nous allons, en ce qui nous concerne, **décupler la « capacité de levage »** de deux petits aimants plats en ferrite!

Si nous pouvons faire mieux que ce grand savant, ce n'est pas seulement parce que nos aimants sont plus forts, mais aussi en raison de la forme des différents objets en cause : aimants, rondelle plate en fer, battants de penture de porte. La rondelle de fer offre, en effet, un très bon contact à la fois avec les pôles plats de nos aimants et avec le bord rectiligne d'un battant de penture.

Procure-toi donc quatre ou cinq vieilles pentures en fer pour les portes extérieures de maison (les dimensions de ces pentures sont d'environ 9 cm × 3,5 cm × 3 mm). Avec deux petits



Avec deux petits aimants plats en ferrite, d'environ 2,5 cm de diamètre, tu pourras à peine soulever un des deux battants d'une penture de porte extérieure de maison. Par contre, si tu appliques une rondelle plate en fer, du même diamètre que les petits aimants, sur l'un des pôles, tu pourras soulever, avec ce pôle, jusqu'à une dizaine de battants attachés l'un à l'autre à l'aide de petites vis et de leurs écrous!

Matériel requis

- 2 aimants plats de 2,5 cm de diamètre
- 4 ou 5 vieilles pentures en fer pour les portes extérieures de maison
- 8 à 10 vis en fer, de 2 à 3 cm, avec leurs écrous
- une rondelle plate en fer, du même diamètre que les aimants

aimants plats en ferrite, d'environ 2,5 cm de diamètre, essaye de soulever un seul battant d'une des pentures, en le prenant par son bord le plus étroit (voir la **figure 3**). Tu devrais à peine y arriver.

Ensuite, insère une rondelle plate en fer, du même diamètre que les aimants, entre ceux-ci et le battant de penture (tu trouveras une rondelle du bon diamètre dans une quincaillerie). Tu verras que le battant adhère fortement à la rondelle. En faisant cela, tu as, en fait, recouvert un des pôles de ta pile d'aimants d'une plaque de fer.

Maintenant, combien de battants de penture peux-tu soulever? Pour le savoir, tu n'as qu'à en attacher plusieurs ensemble, à l'aide de petites vis et de leurs écrous, comme sur l'illustration ci-contre. Tu devrais pouvoir en soulever neuf ou dix! Pour cela, tiens la rondelle entre tes doigts, car elle adhère plus fortement au fer qu'aux aimants. Si tu tiens seulement les aimants, la rondelle va se détacher.

Nous verrons à l'**épisode 1-9** que le fer est constitué de « molécules magnétiques » qui se comportent comme des petits aimants, libres de s'orienter. Cela a pour effet de canaliser et de concentrer les lignes du champ magnétique, et d'augmenter le pouvoir de levage d'un aimant.

Pour en savoir plus

- *De Magnete*, William GILBERT, édition originale en latin, Londres, 1600. Reproduction anglaise : Dover, New York, 1958.

En l'an 1600

Un peu d'histoire

Vers la fin des années 1500, deux hypothèses prévalent pour expliquer le fait que l'aiguille de la boussole s'aligne dans la direction nord-sud.

Tournesol ou montagnes ?

Certains croient que la pierre d'aimant se tourne toujours vers l'étoile polaire (celle qui indique le nord et autour de laquelle les autres étoiles semblent tourner), un peu comme cette fleur géante qu'on appelle « tournesol », qui se tourne toujours vers le Soleil.

D'autres, par ailleurs, pensent qu'il se trouve, au nord, d'énormes montagnes de pierres d'aimant (magnétite, selon l'appellation moderne). Ils pensent également qu'il peut être dangereux de s'en approcher en bateau, de crainte que tous les clous ne soient arrachés par la force d'attraction magnétique.

C'est **William Gilbert**, médecin de la reine Élisabeth 1^{re} d'Angleterre, qui, en 1600, apporte une explication rationnelle basée sur l'expérience.

La boussole « pique du nez »

Notre savant part d'un phénomène qui avait été observé par plusieurs marins de son époque, soit que l'aiguille d'une boussole a tendance à « piquer du nez », même si on accorde tout le soin nécessaire à mettre le pivot en plein centre de l'aiguille.

C'est en voulant régler ce problème qu'un fabricant londonien d'instruments scientifiques, **Robert Norman**, fit, en 1581, l'expérience suivante (**figure 1**). Il transperça un petit morceau de liège avec une aiguille d'acier non aimantée qu'il ajusta de telle façon qu'elle soit bien horizontale lorsqu'il la faisait flotter. Il enleva graduellement des particules de liège, jusqu'à ce que l'aiguille flotte sous la surface de l'eau, en s'assurant qu'elle demeurerait toujours horizontale.



L'expérience de l'aiguille aimantée flottant dans un verre, réalisée par Norman.



Le pôle Nord d'une aiguille aimantée pointe de plus en plus vers le sol lorsqu'on se déplace vers le nord, sur la Terre.

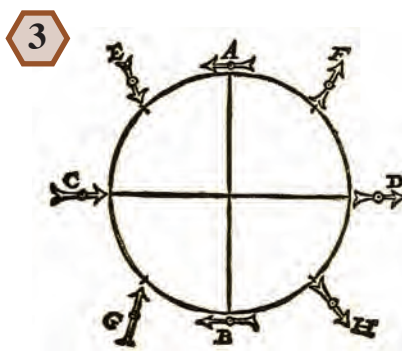


Illustration de Gilbert montrant plusieurs aiguilles de boussole autour d'une terrella. Les pôles magnétiques sont en C et en D.

Il prit ensuite l'aiguille délicatement et l'aimanta en la frottant sur une pierre d'aimant, tout en ayant soin de ne pas déplacer le morceau de liège. En introduisant à nouveau l'aiguille aimantée dans un verre à vin rempli d'eau, celle-ci prit alors une position d'équilibre inclinée. L'alignement de l'aiguille demeurait dans la direction nord-sud, mais elle pointait vers le sol.

En reproduisant cette expérience à différents endroits sur la Terre (**figure 2**), les marins ont observé que l'aiguille pointait de plus en plus vers le sol alors qu'ils se dirigeaient vers le nord.

On appelle **inclinaison magnétique** l'angle que fait l'aiguille de la boussole avec un plan horizontal.

Gilbert analyse et explique

Connaissant ces faits, **William Gilbert** tailla une pierre de magnétite en forme de sphère. Il surnomma cette pierre sphérique « terrella ».

Il localisa ensuite les pôles magnétiques de la pierre, en utilisant la méthode enseignée par **Pierre de Maricourt**, que nous avons apprise dans l'**épisode 1-2**.

En disposant des boussoles tout autour d'une terrella (**figure 3**) notre savant médecin constata qu'elles se comportaient comme à la surface de la Terre ; elles piquaient du nez lorsqu'on approchait des pôles.

Il en conclut que la Terre se comportait comme un gros aimant en forme de sphère.

Le pôle Nord est un pôle Sud !

Le pôle magnétique de la Terre, situé au nord, est en fait un pôle Sud magnétique, puisqu'il attire le pôle Nord magnétique de l'aiguille d'une boussole. On sait en effet que deux pôles magnétiques contraires s'attirent. C'est la façon de définir les pôles magnétiques qui entraîne cette ambiguïté (**épisode 1-2**).

Au laboratoire

De nos jours, il serait difficile de se procurer un aimant en forme de sphère. Aussi allons-nous utiliser, plutôt, une petite pile de nos fameux aimants plats, que tu disposeras dans une assiette à dessert, tel qu'illustré dans la **figure 4**.

Les pôles de cette pile d'aimants peuvent être identifiés à l'aide de la « boussole historique » décrite à l'**épisode 1-1**. On peut également suspendre la pile d'aimants au bout d'un fil à coudre, en gardant l'axe de la pile à l'horizontale. On laisse ensuite la pile s'orienter, et le bout qui fait face au nord est le pôle Nord magnétique de la pile d'aimants.

L'assiette représente une « tranche » de la Terre, et son rebord correspond à la surface de la Terre. L'élastique, utilisé pour maintenir en place la pile d'aimants, symbolise l'équateur terrestre.

L'axe de rotation de la Terre est donc associé à une direction voisine de l'axe de ta pile d'aimants.

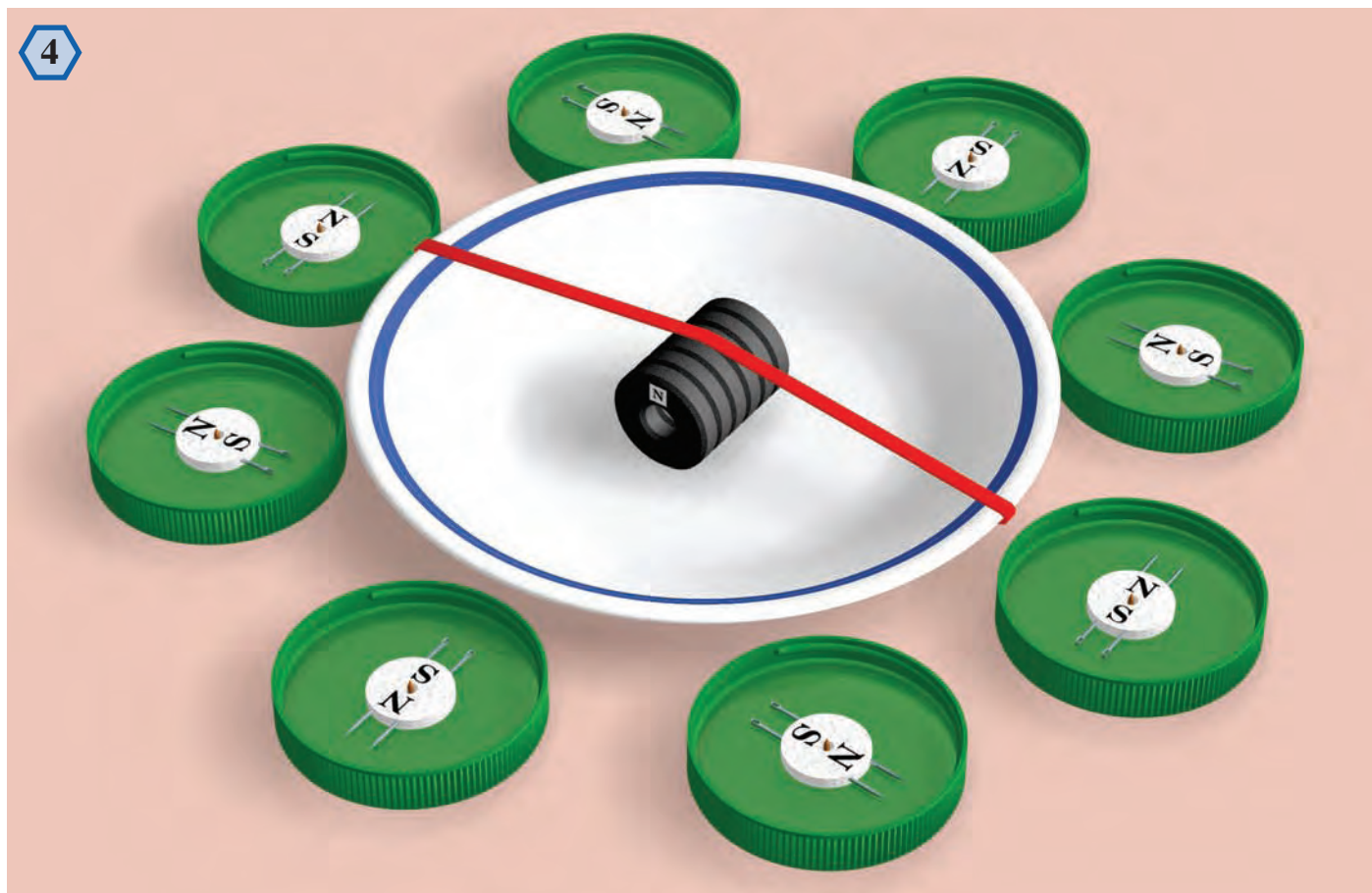
Il y a plusieurs boussoles sur l'illustration, mais, en fait, tu n'as qu'à en utiliser une seule, que tu déplaceras le long du rebord de l'assiette.

Observe bien la boussole piquer du « nez » ou du « derrière », selon le pôle magnétique de l'aimant vers lequel tu te diriges.

Matériel requis

- la boussole « pratique » que nous avons fabriquée à l'épisode 1-1
- une assiette à dessert de 15 à 20 cm de diamètre
- une bande élastique
- une pile de 5 ou 6 aimants plats en ferite de 2,5 cm de diamètre environ
- du fil à coudre

Il en est de même à la surface de la Terre ; le pôle magnétique Nord de l'aiguille d'une boussole pointe de plus en plus vers le sol alors qu'on se dirige vers le nord, sur la Terre.



Une expérience similaire à celle de William Gilbert et qui nous démontre que le comportement d'une boussole autour d'un aimant reproduit ce qu'on observe autour de la Terre. Tout se passe comme s'il y avait un aimant à l'intérieur de la Terre, avec ses pôles magnétiques alignés dans une direction près de celle de l'axe de rotation de la Terre. La bande élastique sur cette figure représenterait la ligne de l'équateur terrestre.

Pour en savoir plus

- *De Magnete*, William GILBERT, édition originale en latin, Londres, 1600. Reproduction anglaise : Dover, New York, 1958.

En l'an 1600

Un peu d'histoire

Dans l'épisode 1-2, nous avons vu de quelle façon **Pierre de Maricourt** avait découvert, en 1269, que deux aimants peuvent s'attirer ou se repousser selon les pôles qui se font face.

Par contre, un morceau de fer non aimanté est toujours attiré par un aimant, peu importe le pôle de l'aimant que l'on approche du morceau de fer. Il n'y a jamais de répulsion. Pourquoi? Voilà une autre question que s'est posée notre médecin chercheur anglais, **William Gilbert** (figure 1), dont nous avons fait la connaissance dans les trois derniers épisodes.

Une première expérience

Notre scientifique tenace conçoit donc une expérience qui lui permettra de trouver une réponse à sa question. Il suspend une petite tige de fer non aimantée, placée horizontalement, en utilisant un fil attaché au centre de la tige. Il approche ensuite une pierre d'aimant de la tige, sans la toucher avec la pierre. Il constate que la tige de fer prend la même direction que prendrait l'aiguille aimantée d'une boussole ayant la même longueur que la tige.

Il lui vient alors à l'esprit qu'il apparaît peut-être des pôles magnétiques dans la tige de fer, comme il s'en trouve dans l'aiguille d'une boussole. Pour vérifier cette hypothèse, alors que la tige de fer est à proximité de la pierre d'aimant, il présente successivement, à chacun des bouts de la tige de fer, le pôle Nord magnétique d'un barreau aimanté. Il observe ainsi que l'un des bouts de la tige de fer est attiré par le pôle Nord du barreau aimanté, alors que l'autre bout de la tige est repoussé par celui-ci.

Tout se passe donc comme si la tige de fer devenait aimantée de façon temporaire lorsqu'elle était mise en présence d'un aimant. En retirant l'aimant, les pôles magnétiques de la



William Gilbert (1544-1603) (Musée de la civilisation, bibliothèque du Séminaire de Québec. William Gilbert dans : *The Electrical World, New York, May 30, 1891*).

tige disparaissent. Il peut voir cela avec son barreau aimanté puisque celui-ci attire alors les deux bouts de la tige de fer et n'en repousse aucun.

On nomme cette aimantation temporaire une **aimantation induite**. Le fer étant attiré par un pôle d'aimant, tu auras deviné sans doute que deux pôles contraires interagissent. Le pôle induit, dans la région du morceau de fer voisine immédiate du pôle de l'aimant, est un pôle contraire à celui de l'aimant. Tu te rappelles, en effet, qu'un pôle Nord magnétique attire un pôle Sud, et inversement.

Une deuxième expérience

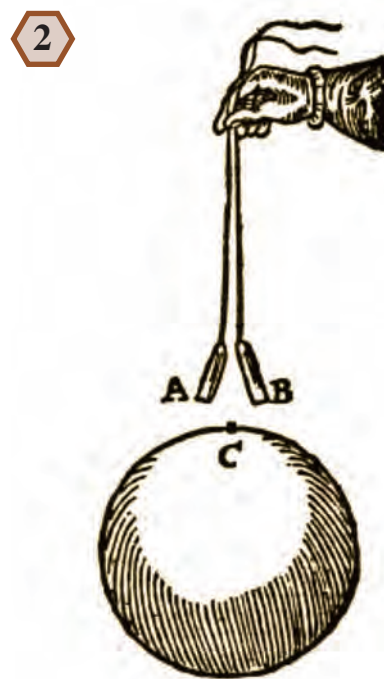
De manière à confirmer ses déductions, **Gilbert** conçoit une deuxième expérience. Il suspend, par des fils, deux petites tiges de fer non aimantées, au-dessus du pôle Nord magnétique d'une pierre d'aimant sphérique (figure 2). Il constate alors que les deux petites tiges se repoussent.

Ce comportement correspond bien aux déductions qu'il avait faites. En effet, les bouts des tiges près du pôle Nord magnétique de la pierre d'aimant acquièrent chacun un pôle Sud induit,

et les deux pôles Sud se repoussent, comme c'est le cas entre les pôles Sud de deux tiges aimantées. Il en est de même pour les deux autres bouts des tiges (ceux qui sont plus éloignés de la pierre d'aimant), dans lesquels apparaissent des pôles Nord induits, qui se repoussent eux aussi.

Fer et acier

Il peut arriver qu'une faible aimantation persiste dans la tige de fer après qu'on ait retiré l'aimant, mais cette aimantation est fragile et peut être facilement renversée ou éliminée. Par contre, l'acier (mélange de fer et d'un peu de carbone) peut conserver une partie importante de l'aimantation induite, surtout s'il s'agit d'acier trempé (acier chauffé à blanc et refroidi rapidement en le trempant dans un liquide).



Expérience de Gilbert sur l'aimantation induite. Le pôle Nord magnétique d'une pierre d'aimant sphérique est indiqué par la lettre C. En approchant deux petites tiges de fer de ce pôle, il apparaît dans les bouts A et B, ceux qui sont le plus près du pôle Nord C, des pôles Sud magnétiques qui se repoussent.

Au laboratoire

Reproduisons, dans notre labo domestique, la première expérience de **William Gilbert**.

Tu n'as qu'à utiliser le même matériel qu'à l'**épisode précédent**. Il te faudra fabriquer une autre rondelle de polystyrène de deux centimètres.

Les tiges de fer aimantées seront les aiguilles de ta boussole. Il te faut également deux tiges de fer non aimantées, que tu obtiendras en coupant des trombones métalliques dépliés, à la même longueur que tes aiguilles, en utilisant une pince coupante.

Il est important de t'assurer que ces tiges de fer ne sont pas aimantées en vérifiant qu'elles n'attirent pas des objets en fer légers, comme des agrafes, par exemple. Ensuite, insère tes deux tiges de fer, non aimantées, dans la rondelle de polystyrène, comme pour ta boussole (**figure 3**). Utilise une aiguille à coudre pour percer les trous dans le polystyrène avant d'y insérer les tiges de fer.

Déplace ta boussole remplie d'eau autour de l'assiette, et fais de même en utilisant les tiges de fer non aimantées à la place des aiguilles aimantées de ta boussole. Tu verras que les tiges de fer

se comportent comme si elles étaient aimantées.

Pendant que tes tiges non aimantées sont dans le couvercle de la boussole, près du rebord de l'assiette, approche un des bouts de tes aiguilles aimantées, disons leurs pôles Nord magnétiques, de l'un des bouts de tes tiges de fer qui flottent, puis de l'autre bout de tes tiges.

Tu constateras qu'un bout des tiges est attiré, alors que l'autre bout est repoussé, comme s'il y avait deux pôles magnétiques contraires. Tu peux même identifier de quel pôle il s'agit, sachant que deux pôles semblables se repoussent. Tu constateras ainsi que le pôle induit dans l'extrémité des tiges de fer le plus près de l'aimant est contraire au pôle de l'aimant qui lui fait face.

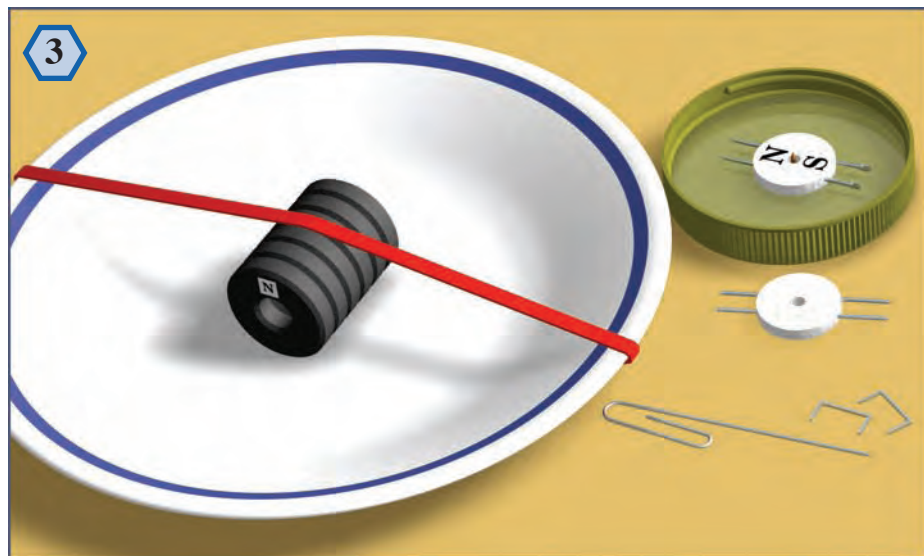
Enfin, éloigne le couvercle avec les tiges de fer non aimantées loin de l'aimant, et vérifie que tes aiguilles aimantées attirent les deux bouts de tes tiges de fer, comme si les pôles qui y semblaient présents avaient disparu.

Tu peux également refaire la **deuxième expérience de Gilbert** à l'aide d'un aimant en ferrite rectangulaire dont les pôles magnétiques sont sur les deux plus grandes surfaces. Attache deux trombones en fer à l'aide d'un bout de fil à coudre, tel qu'illustré

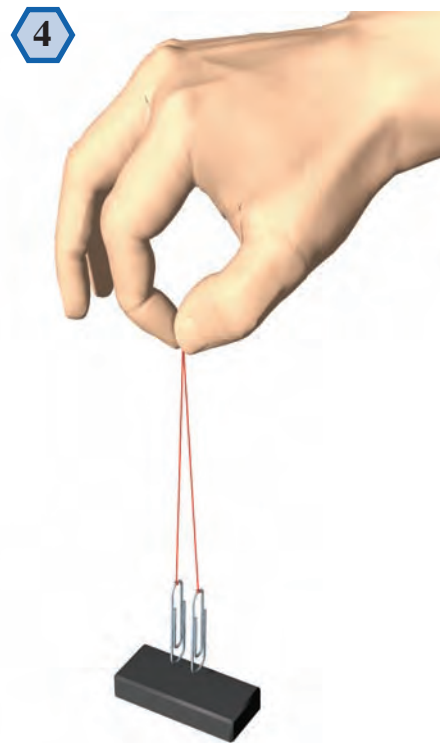
Matériel requis

- matériel de l'épisode 1-5
- un aimant en ferrite rectangulaire de $2\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ environ, avec les pôles sur les grandes surfaces
- une rondelle supplémentaire de polystyrène de 2 cm taillée à même un plateau utilisé pour l'emballage de morceaux de viande
- 4 trombones métalliques servant à retenir des papiers
- du fil à coudre
- quelques agrafes métalliques pour agrafeuse de bureau

dans la **figure 4**. Tu verras les deux trombones se repousser lorsque tu les approcheras de l'aimant.



Reconstitution de la première expérience de Gilbert sur l'aimantation induite.



Reconstitution de la deuxième expérience de Gilbert sur l'aimantation induite.

Pour en savoir plus

- *De Magnete*, William GILBERT, édition originale en latin, Londres, 1600. Reproduction anglaise : Dover, New York, 1958.

En l'an 1644

Un peu d'histoire

Lorsqu'on répand de fines parcelles de fer non magnétisées autour d'un aimant, il se forme de belles figures. On y décèle des lignes de force invisibles, semblant sortir de l'aimant.

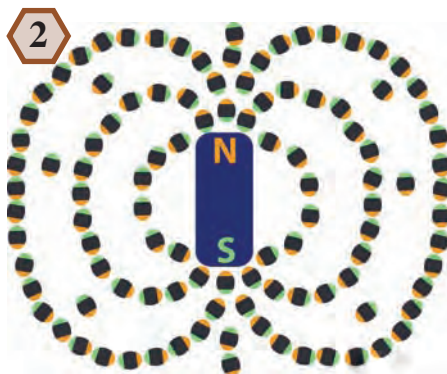
Cette découverte intéressante a été faite par notre célèbre médecin anglais **William Gilbert**, et elle a été popularisée par un philosophe français bien connu, **René Descartes**. Ce dernier a été le premier à publier des reproductions de ces merveilleux dessins ou «**spectres magnétiques**» (figure 1), dans un livre intitulé *Les principes de la philosophie*, paru en 1644.

L'aimantation induite dessine

L'explication de ce phénomène vient des observations faites par **Gilbert** sur l'aimantation induite.

Comme nous l'avons vu dans l'épisode précédent, dans un morceau de fer placé à proximité d'un aimant, il apparaît des pôles magnétiques induits par l'aimant.

Ainsi, les pôles magnétiques induits dans une parcelle de fer interagissent avec les pôles magnétiques induits dans les parcelles de fer voisines. Il en résulte que les parcelles s'attirent et s'attachent les unes aux autres pour former les lignes des spectres magnétiques (figure 2).



Un pôle Sud magnétique (en vert) et un pôle Nord magnétique (en orange) sont induits dans chaque parcelle de fer autour d'un aimant. Une parcelle tend à s'aligner dans la même direction qu'une petite aiguille de boussole le ferait au même endroit, et les parcelles de fer s'attirent entre elles.

Le champ magnétique

Plus tard, on parlera plutôt des lignes de force du «**champ magnétique**» ; l'appellation «**champ magnétique**» ayant d'ailleurs été introduite par **William Gilbert** afin de décrire la zone d'influence qui entoure un aimant.

Ces lignes de force du **champ magnétique** représentent la direction que prendraient des petites aiguilles de boussole disposées tout autour des aimants. Les lignes sont plus denses là où la force magnétique est plus intense.

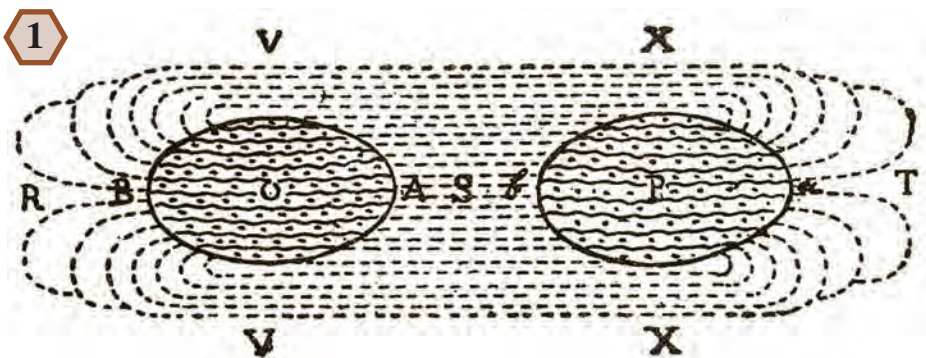
Une plus grande intensité de la force magnétique se traduit par une action plus «vigoureuse» pour aligner l'aiguille d'une boussole (l'aiguille revient plus rapidement dans la direction d'alignement lorsqu'on l'écarte de cette direction).

Des lignes en forme d'anneau

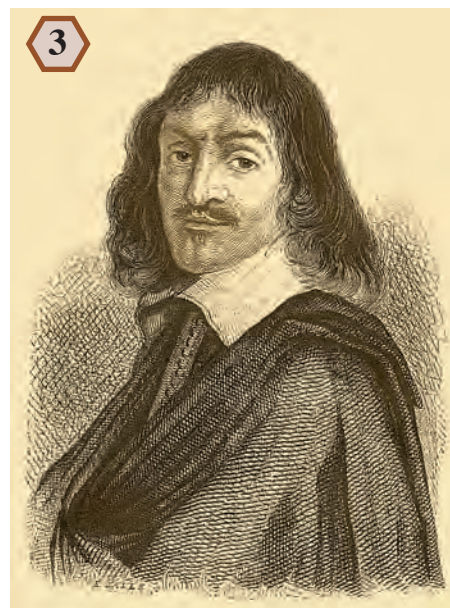
C'est **Descartes** (figure 3) qui a découvert la forme en anneau des lignes apparaissant dans les spectres magnétiques.

Chaque ligne qui part de l'aimant revient en un autre point de ce dernier, formant ainsi un anneau avec l'aimant. Selon **Descartes**, les petits morceaux de fer s'alignent autour d'un aimant un peu comme une girouette s'aligne dans le vent. Il pense qu'il y a un «vent» transportant des corpuscules qui seraient projetés par un pôle et aspirés par l'autre pôle. Ces corpuscules invisibles tourneraient donc toujours en rond, sortant par un bout de l'aimant et rentrant par l'autre.

Même si les explications de **René Descartes** nous apparaissent simplistes aujourd'hui, il ne faut pas oublier qu'il utilisait le langage de son époque.



Ce dessin, tiré du livre *Principes de la philosophie* (1644) de René Descartes, montre le «spectre magnétique» produit par deux aimants voisins orientés suivant la ligne passant par leurs pôles, avec deux pôles contraires se faisant face (référence A6-1905, bibliothèque de l'Université Laval, Québec).



René Descartes (1596-1650)

Au laboratoire

Pour répéter les expériences de **Gilbert** et de **Descartes**, il serait ardu de fabriquer de la limaille de fer. Nous utiliserons plutôt des petits bouts de fil de fer d'un à deux millimètres. Tu les obtiendras en les coupant, avec un vieux ciseau, à même un fil de fer à multiples brins, du type de ceux que l'on utilise pour suspendre les tableaux. Ne prends pas les plus gros fils qui seraient trop difficiles à couper.

Il faudra couper environ soixante centimètres de fil à tableau pour en avoir une quantité raisonnable. Tu garderas ces bouts de fil dans le contenant cylindrique en plastique.

Fixe les aimants, dont tu veux observer les lignes du champ magnétique,

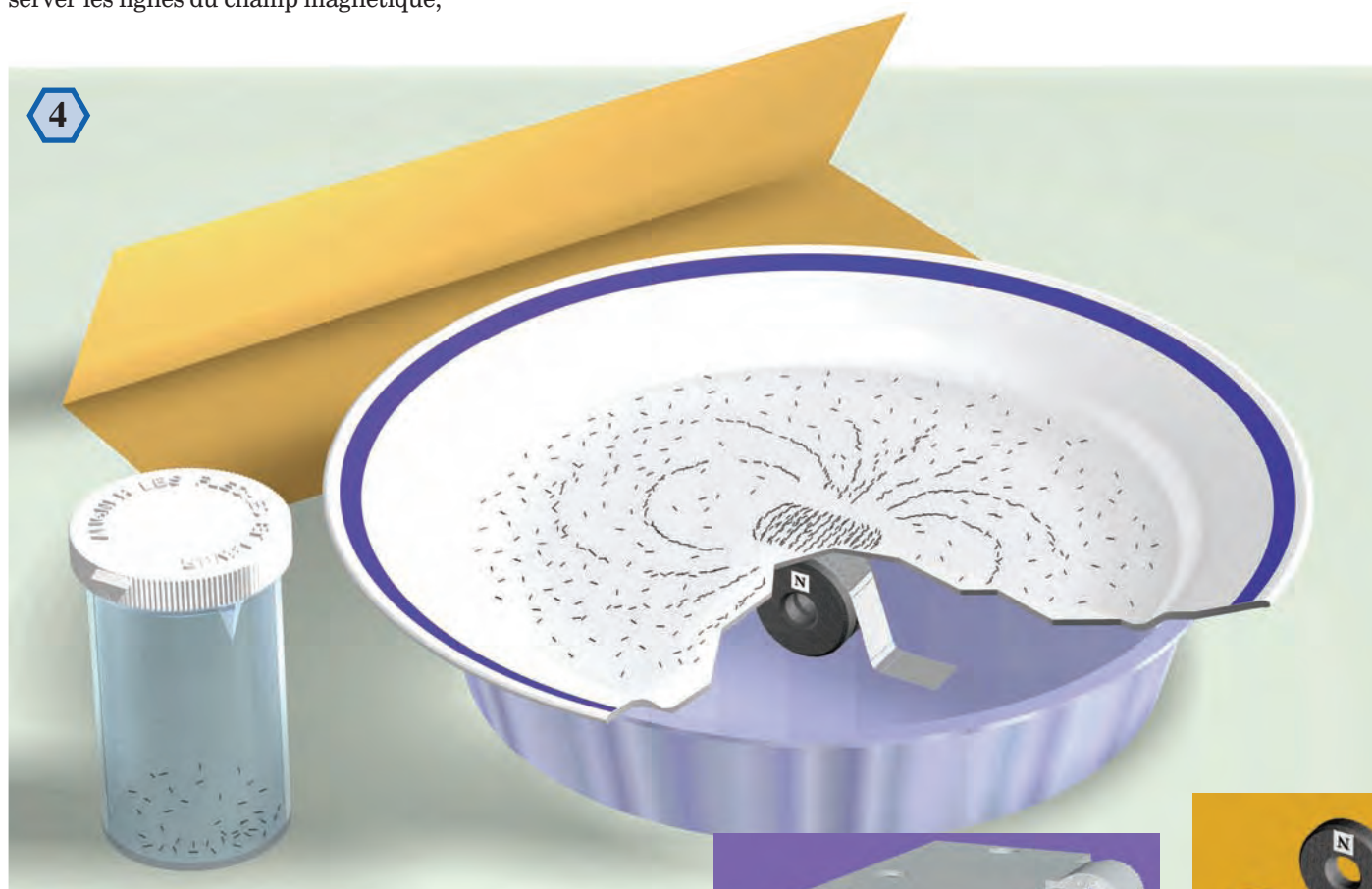
sur le fond d'un moule à gâteau en aluminium, avec du ruban adhésif. Assure-toi que le moule est bien en aluminium et pas en fer, en vérifiant que les aimants ne collent pas dessus. Dispose ensuite une grande assiette sur le moule à gâteau, tel qu'illustré sur la **figure 4**.

Il ne te reste plus qu'à saupoudrer tes petits bouts de fil uniformément dans l'assiette, et à tapoter avec tes doigts sur les rebords de celle-ci afin de faciliter le déplacement des bouts de fil.

Le carré de carton plié en deux sera très utile pour ramasser les bouts de fil de fer et les remettre dans leur contenant de plastique.

Matériel requis

- une grande assiette
- un moule à gâteau en aluminium
- quelques aimants plats de 2,5 cm de diamètre environ
- du ruban adhésif
- environ 60 cm de fil de fer à multiples brins pour les tableaux de 10 à 15 kg
- un contenant de plastique cylindrique de 4 à 5 cm de diamètre, comme ceux utilisés en pharmacie pour les comprimés
- un rectangle de carton de 15 cm sur 30 cm



Avec cet équipement, tu seras en mesure de bien visualiser les phénomènes magnétiques. En disposant la pile d'aimants et la peinture sous l'assiette, tu pourras vérifier que ce sont bien les bords de la peinture qui attirent les bouts de fil de fer. Essaie également avec deux aimants dont les pôles semblables se font face.

Pour en savoir plus

- *Principia philosophiae*, René DESCARTES, édition originale en latin, 1644. Édition récente en français: *Les principes de la philosophie*, dans *Oeuvres de Descartes*, tome 9, vol. 2, Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 1978.

De 1777 à 1789

Un peu d'histoire

Charles-Augustin Coulomb, un grand ingénieur militaire français, soumet plusieurs mémoires sur le magnétisme des aimants à l'Académie Royale des Sciences de Paris, de 1777 à 1789. Dans ces mémoires, il décrit une série d'expériences originales et nous fait part de ses réflexions pénétrantes.

Deux fluides magnétiques

Pour **Coulomb**, l'existence des pôles magnétiques implique l'existence de deux fluides magnétiques différents : un « **fluide boréal** » qui se concentre dans le pôle Nord et un « **fluide austral** » qui se concentre dans le pôle Sud d'un corps magnétisé. Selon sa logique, **deux fluides magnétiques semblables se repoussent et deux fluides contraires s'attirent**, ce qui rendrait compte de la loi d'attraction et de répulsion des pôles magnétiques que nous avons vue à l'**épisode 1-2**.

Toujours deux pôles égaux

Nous savons que la force de gravitation attire tous les corps vers le bas. Mais y a-t-il une force magnétique résultante, exercée par les pôles magnétiques terrestres, sur une aiguille aimantée ? Une force qui attirerait l'aiguille, dans son ensemble, dans une direction plus qu'une autre ?

Coulomb répond que non, en se basant sur deux expériences qu'il a effectuées. Dans la première, il suspend des tiges aimantées à l'aide de fils de soie et constate que le fil de soie est toujours parfaitement vertical. Il en conclut qu'il n'y a pas de force magnétique résultante horizontale.

Dans une deuxième expérience, il pèse une tige d'acier avant et après aimantation et ne constate aucune différence de poids. Il en conclut qu'il n'y a pas de force magnétique résultante verticale.

Chacun des pôles magnétiques de la Terre attire, dans la tige aimantée,



Charles-Augustin Coulomb (1736-1806) (Réunion des Musées Nationaux / Art Resource, NY).

le pôle contraire au sien avec la même force qu'il repousse l'autre pôle. Les forces sur les deux pôles de la tige étant égales et opposées, seule une rotation de la tige en résulte.

Notre savant en conclut que :

1) Chacun des deux pôles d'un objet aimanté contient la même quantité de fluide magnétique.

2) Localement, les forces causées par le magnétisme terrestre ne varient pas en fonction de la position (sinon un pôle d'une longue tige aimantée pourrait subir une force plus grande que l'autre, les deux pôles n'étant pas au même endroit).

Les molécules magnétiques

Notre ingénieur à l'esprit pénétrant continue sa réflexion et aboutit à la notion de « **molécules magnétiques** » pour expliquer ce qui se passe lorsqu'on sectionne une tige aimantée. Souviens-toi, les deux pôles magnétiques réapparaissent toujours, avec des intensités égales, dans chacun des deux morceaux de la tige sectionnée (**épisode 1-2**).

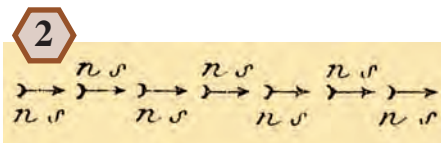


Illustration du modèle moléculaire magnétique de Coulomb (tirée de son mémoire de 1789). Les molécules magnétiques sont représentées par des petites flèches.

Selon **Coulomb**, chacune des petites parties d'un corps magnétique, qu'il appelle « **molécules magnétiques** », possède les deux fluides en quantité égale. Chacun de ces fluides se retrouve à l'une des deux extrémités d'une molécule magnétique, mais ils ne peuvent quitter une molécule magnétique pour passer à une autre.

Toujours selon notre grand savant, le fait d'aimanter une tige en acier aligne toutes ses molécules magnétiques dans la même direction, le long de l'axe de la tige (voir la **figure 2**). Ainsi, seules les molécules magnétiques aux extrémités de la tige vont manifester des forces magnétiques, car, tout le long de la tige, le « **fluide boréal** » d'une molécule fait face au « **fluide austral** » de la molécule suivante et leurs effets s'annulent. Seuls le fluide boréal et le fluide austral des molécules situées aux extrémités de la tige conservent leur effet et manifestent donc des forces magnétiques.

Cette théorie des molécules magnétiques nous permet de comprendre pourquoi la force magnétique se concentre dans les « bouts actifs » ou **pôles magnétiques** d'un aimant. Elle permet également d'expliquer l'apparition des deux pôles magnétiques dans chacun des deux morceaux d'un aimant sectionné.

De longues tiges aimantées

Pour étudier de façon quantitative les forces qui s'exercent entre les pôles magnétiques, **Coulomb** aimante de longues tiges d'acier de 60 cm. De cette façon, il arrive à éloigner suffisamment les deux pôles pour faciliter la mesure des forces de chacun d'eux, individuellement.

Mais d'abord, il vérifie que les fluides magnétiques se concentrent bien dans les bouts d'une tige aimantée, en observant comment varie l'orientation d'une petite aiguille aimantée lorsqu'il la déplace autour de la tige (voir la section « **Au laboratoire** »).

Au laboratoire

Procure-toi une vieille lame de scie à métaux. Ces lames sont faites d'acier trempé (alliage de fer et de carbone refroidi rapidement dans un liquide), comme les tiges qu'aimantait **Coulomb**. L'acier trempé a la propriété de conserver l'aimantation qu'on lui communique à l'aide d'un aimant, alors que le fer pur la perd presque entièrement dès qu'on enlève l'aimant.

Pour aimanter ta lame de scie, fixe-la sur une surface plane à l'aide d'un bout de ruban adhésif, placé au centre de la lame. Ensuite, frotte la lame une dizaine de fois avec deux piles d'aimants, comme ceux que nous avons utilisés jusqu'ici, selon la méthode illustrée sur la **figure 3**. Les pôles (des piles d'aimants) qui touchent la lame doivent être contraires, c'est-à-dire un pôle Nord et un pôle Sud. On doit frotter la lame en partant de son centre et en

faisant glisser simultanément les piles d'aimants en sens contraire, chacune vers une des extrémités de la lame. Lorsque les aimants sont rendus aux extrémités, il faut les soulever et les ramener au centre, comme l'indiquent les flèches pointillées de la figure 3. Cette technique d'aimantation, qu'a utilisée **Coulomb** lui-même, est communément appelée « méthode de la double touche ».

Les pôles qui apparaîtront aux extrémités de la lame de scie seront contraires aux pôles des aimants qui ont touché ces bouts. Tu pourras inscrire un **N** et un **S** pour identifier les pôles de ta lame.

Pour observer que les pôles magnétiques sont bien localisés dans les bouts de la lame, utilise la « boussole pratique » que nous avons fabriquée à l'**épisode 1-1**. Tu constateras que les aiguilles aimantées de la boussole pointent vers un endroit situé à environ

Matériel requis

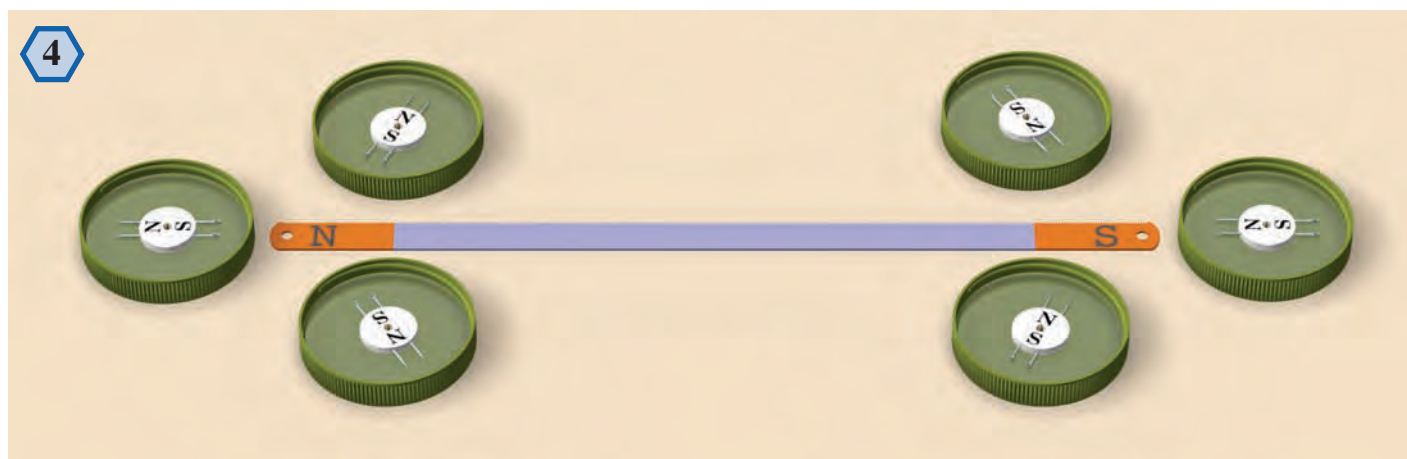
- une lame de scie à métaux d'environ 30 cm de long
- 10 ou 12 petits aimants plats en ferrite de 2,5 cm de diamètre
- la « boussole pratique » construite à l'épisode 1-1
- du ruban adhésif

un centimètre de chaque bout, comme l'avait observé **Coulomb**.

Si tu éloignes la boussole un peu trop de la lame, la force des pôles de la lame diminue, et la force magnétique terrestre prend le dessus.



Méthode dite de la « double touche », utilisée pour aimanter une lame de scie à métaux en acier d'environ 30 cm.



En aimantant de longues tiges d'acier, **Coulomb** démontre que les pôles magnétiques sont localisés près des bouts des tiges. Ceci, il peut le déduire simplement en observant l'orientation d'une aiguille aimantée à différents endroits autour de ses tiges. Tu peux faire de même en déplaçant la boussole que tu as déjà construite autour de la lame de scie à métaux aimantée.

Pour en savoir plus

- Collection de mémoires relatifs à la physique, publiée par la Société française de physique, tome 1. *Mémoires de Coulomb*, Gauthier-Villars, Paris, 1884. Nouvelle édition : Librairie scientifique et technique Albert Blanchard, Paris, 2002.

De 1777 à 1789

Un peu d'histoire

En 1777, **Coulomb** essaie d'améliorer l'aimantation des aiguilles de boussole afin de les rendre plus sensibles.

Des barreaux qui oscillent

Il observe qu'en suspendant un barreau aimanté par un fil (**figure 1**), ce dernier oscille horizontalement autour de l'axe de suspension, de part et d'autre de la direction indiquée par une boussole, avec une fréquence d'oscillation d'autant plus rapide que le barreau a été fortement aimanté.

Coulomb mesure ces fréquences d'oscillation pour le guider dans l'amélioration des techniques d'aimantation.

Il entreprend une série d'expériences pour comparer l'aimantation d'une multitude de barreaux constitués de différents types d'acier, ayant été aimantés par différentes méthodes et possédant différentes formes.

Les lames l'emportent

Il découvre ainsi que pour des barreaux fabriqués du même acier et aimantés de la même manière, ayant la même longueur et le même poids, le magnétisme sera plus grand dans celui qui est mince et large.

De plus, il constate que si une lame est séparée en deux parties, dans le sens de la longueur, on peut aimanter plus fortement chacune des parties que si elles avaient été ensemble.

Par la suite, on fabriquera de puissants aimants en regroupant plusieurs lames d'acier, minces et larges, aimantées séparément (voir la **figure 2**).

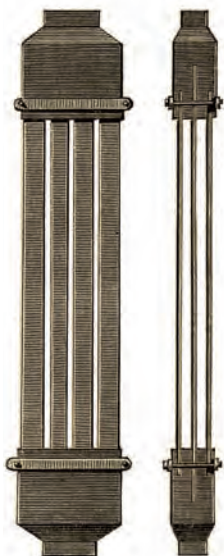
1



Coulomb suspend des barreaux aimantés et mesure leur fréquence d'oscillation. Plus les oscillations sont rapides et plus l'aimantation du barreau est importante.

2

Deux vues d'un aimant artificiel, constitué de douze lames d'acier aimantées séparément, tel qu'on le fabriquait au 19^e siècle. Des bouts en fer regroupent les pôles semblables des lames et concentrent les lignes du champ magnétique.



L'influence des molécules

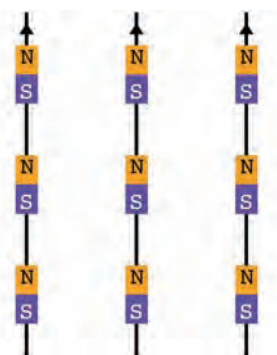
Notre ingénieur militaire explique ces résultats à l'aide de son concept de molécules magnétiques (épisode précédent). Le champ magnétique (voir l'épisode 1-7) de l'aimant qu'on utilise pour aimanter une lame d'acier tend à aligner les molécules magnétiques à l'intérieur de la lame, tel qu'illustré sur la **figure 3**.

Toutefois, les molécules magnétiques possèdent leur propre champ magnétique et tendent à aligner les molécules voisines suivant leur propre champ. La **figure 4** nous montre le champ d'une molécule et comment les molécules voisines s'aligneraient dans son champ (réfère-toi à l'expérience de l'épisode 1-5). En comparant avec la **figure 3**, on constate que le champ de la molécule contribue à aligner les molécules situées devant et derrière elle dans la même direction que le fait le champ d'aimantation extérieur (**figure 3**). Par contre, le champ d'une molécule

tend à aligner les molécules latérales en sens inverse du champ extérieur. Pour faciliter l'aimantation, on a donc intérêt à éloigner le plus possible les molécules latérales les unes des autres. Or, c'est justement ce que fait une lame d'acier large et mince; cette forme maximise l'éloignement latéral des molécules magnétiques.

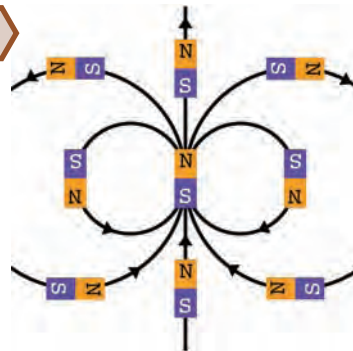
C'est également l'influence mutuelle des molécules magnétiques qui nous fait comprendre pourquoi les forces magnétiques sont déviées vers les bords d'une plaque de fer (voir l'épisode 1-3). Les molécules tendent à s'aligner de la façon qui est la plus facile pour elles, soit dans le plan de la plaque. En effet, de cette manière, le nombre de molécules latérales proches est minimal et le nombre de molécules dans l'axe de leur alignement est maximal.

3



Alignement des molécules magnétiques suivant les lignes du champ magnétique d'un aimant externe. Les flèches indiquent la direction de la force sur les pôles Nord.

4



Le champ magnétique d'une molécule (celle du centre) et l'alignement des molécules voisines suivant ce champ.

Au laboratoire

À l'aide de la lame de scie à métaux que nous avons aimantée à l'épisode précédent, tu pourras reproduire facilement l'expérience de **Coulomb**. Il te suffira de suspendre la lame à l'aide de fil à coudre, comme sur la **figure 5**. Utilise une punaise piquée dans la moulure supérieure d'un cadre de porte pour fixer le fil. Assure-toi que le fil n'est pas tordu, afin de ne pas perturber l'oscillation de la lame.

de 3 cm environ. Aimante-les comme nous l'avons fait dans l'**épisode 1-1**, et insère-les dans les trous d'un bouton à pression, tel qu'illustré sur la **figure 6**. Tu devras probablement utiliser une pince pour plier les rebords du bouton afin de les insérer plus facilement. Fixe-les ensuite avec du ruban adhésif (les pôles semblables ensemble). Le pivot est constitué d'une épingle de couturière

maintenue à la verticale, la pointe vers le haut, grâce à un morceau de bouchon de liège qu'elle traverse.

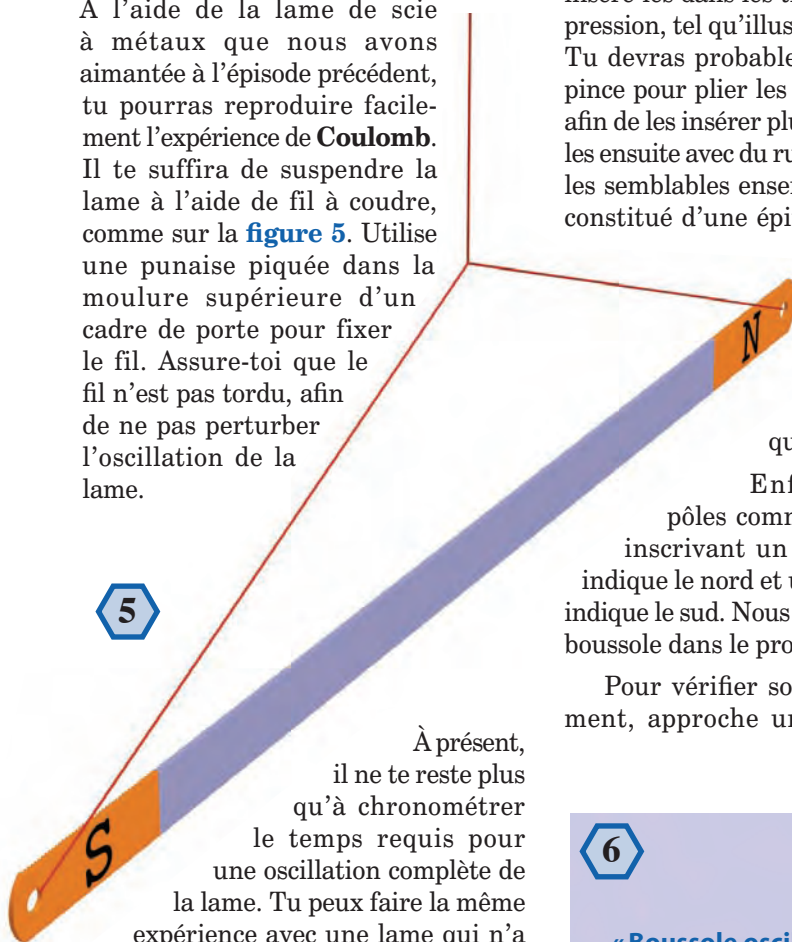
Enfin, marque les pôles comme à l'habitude en inscrivant un **N** sur le côté qui indique le nord et un **S** sur le côté qui indique le sud. Nous allons utiliser cette boussole dans le prochain épisode.

Pour vérifier son bon fonctionnement, approche une pile d'aimants

Matériel requis

- la lame de scie à métaux aimantée de l'épisode 1-8
- du fil à coudre
- BOUSSOLE OSCILLANTE**
- 4 ou 5 petits aimants plats en ferrite de 2,5 cm de diamètre
- un bouchon de liège
- 2 aiguilles à coudre
- une épingle de couturière
- un bouton à pression
- du ruban adhésif

en ferrite de ta boussole oscillante, et désaligne les aiguilles aimantées avec un doigt. En enlevant ton doigt, les oscillations vont s'amorcer, et tu pourras vérifier qu'elles sont plus rapides lorsque l'aimant est plus près de la boussole.

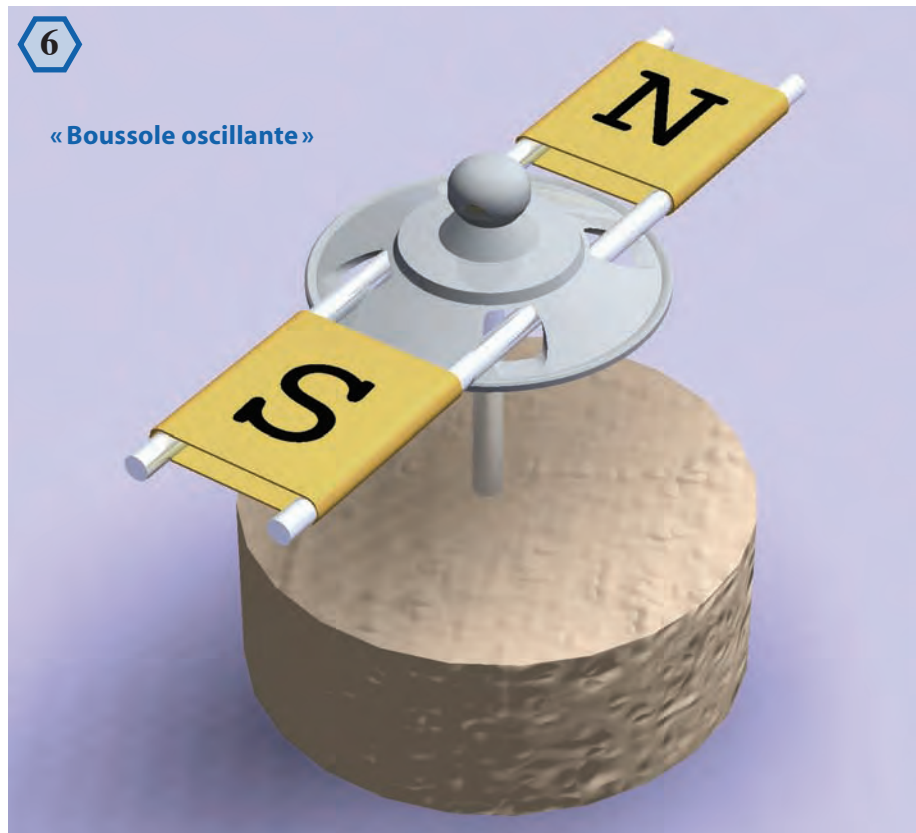


À présent, il ne te reste plus qu'à chronométrer le temps requis pour une oscillation complète de la lame. Tu peux faire la même expérience avec une lame qui n'a pas été aimantée, afin de constater la différence.

Ce sont les forces entre les pôles magnétiques de la Terre et ceux de la lame qui sont la cause de ces oscillations.

Coulomb a également suspendu des petites aiguilles aimantées à des fils de soie. En déplaçant une telle aiguille autour d'un aimant et en mesurant ses fréquences d'oscillation, il a compris qu'on pouvait évaluer quantitativement les forces magnétiques de l'aimant, à différents endroits autour de celui-ci (voir le **prochain épisode**).

Mais au lieu de suspendre une aiguille à un fil, nous construirons une « **boussole oscillante** », pratique et compacte. Prends donc deux aiguilles à coudre et sectionne leurs têtes et leurs pointes avec une pince coupante, de manière à obtenir deux tiges d'acier



Pour en savoir plus

- *Collection de mémoires relatifs à la physique*, publiée par la Société française de physique, tome 1. *Mémoires de Coulomb*, Gauthier-Villars, Paris, 1884. Nouvelle édition : Librairie scientifique et technique Albert Blanchard, Paris, 2002.

En l'an 1785

Un peu d'histoire

Le présent épisode décrit une expérience très simple que **Coulomb** a effectuée, en 1785, pour quantifier les forces entre deux pôles magnétiques.

Une expérience simple

Notre savant mesure la fréquence d'oscillation d'une petite aiguille aimantée de 2,5 cm, à différentes distances de l'un des pôles d'une longue tige aimantée de 63,5 cm (voir la **figure 1**).

Pour établir le lien entre la fréquence d'oscillation de l'aiguille et les forces s'exerçant sur ses pôles, il a recours aux lois de la mécanique et aux techniques mathématiques développées par **Newton** une centaine d'années auparavant.

Il démontre que les forces horizontales qui font osciller un barreau ou une aiguille aimantés sont proportionnelles au carré de la fréquence d'oscillation du barreau.

1



En mesurant les fréquences d'oscillation d'une petite aiguille aimantée, à différentes distances de l'un des pôles d'une longue tige aimantée, Coulomb en déduit la loi exprimant la force entre les pôles magnétiques en fonction de leur distance.

Ainsi, lorsque dans un temps donné une aiguille aimantée fait une oscillation à l'emplacement **A**, alors que dans le même temps elle en fait trois à l'emplacement **B**, les forces magnétiques en **B** seront neuf fois plus grandes ($3 \times 3 \times 3 = 9$) qu'en **A**.

Beaucoup de minutie

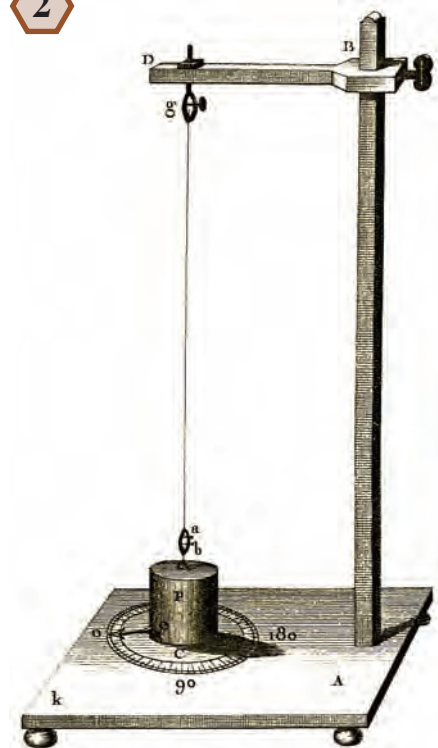
Coulomb accorde beaucoup de soin à chacun des détails de son expérience. Pour éliminer l'influence du champ magnétique terrestre, il mesure la fréquence d'oscillation de son aiguille en l'absence de la tige aimantée. Ensuite, il soustrait le carré de cette fréquence de chacune des mesures ultérieures prises avec la tige aimantée. En ce qui nous concerne, dans la section **Au laboratoire** de cet épisode, nous annulerons le champ magnétique terrestre avec un aimant, comme le feront plusieurs scientifiques après **Coulomb**. Cette approche simplifie l'analyse des résultats expérimentaux.

Notre homme de science français prend également en compte chacun des pôles de l'aiguille et de la tige aimantée dans l'analyse de ses résultats. Pour simplifier cet aspect, dans la section **Au laboratoire**, nous limiterons nos mesures à une plage de distances pour laquelle l'analyse se simplifie. Le but étant surtout de se familiariser avec la simplicité et l'ingéniosité de l'expérience de **Coulomb**.

Ce dernier n'arrête pas là sa minutie. Il veut s'assurer que la torsion du fil lui-même, auquel est suspendue l'aiguille aimantée, a une influence négligeable sur le mouvement de l'aiguille. Il entreprend donc une étude détaillée sur la force de réaction de torsion des fils. L'appareil qu'il construit, à cet effet, est illustré sur la **figure 2**.

Cette étude va le conduire à mettre au point un instrument simple et ingénieux, la « balance à torsion » (voir le **prochain épisode**).

2



Appareil de Coulomb, pour étudier la torsion des fils, afin de s'assurer que cette torsion exerce une influence négligeable sur l'oscillation des aiguilles aimantées.

Les forces varient comme $1/r^2$

Ayant pris toutes ces précautions, **Coulomb** découvre que la force **F** entre deux pôles magnétiques varie comme l'inverse du carré de la distance **R** entre ces pôles et qu'elle est proportionnelle au produit de l'intensité **M₁** et **M₂** de chacun des pôles, d'où

$$F = k \frac{M_1 M_2}{R^2}$$

où **k** est une constante. Il mesure l'intensité **M** des pôles en comparant l'oscillation des aiguilles et des tiges aimantées, sous l'action du champ magnétique terrestre. **M** représente, en fait, la quantité de fluide magnétique ou la « masse magnétique » présente dans un pôle.

Au laboratoire

Cette expérience s'adresse principalement à ceux qui ont des notions d'algèbre et qui savent transposer en graphique des tableaux de données.

Fixe la lame de scie à métaux, que tu as aimantée à l'**épisode 1-8**, à une bouteille de shampooing, tel qu'illustré dans la **figure 3**. L'expérience consiste à mesurer la fréquence d'oscillation f des aiguilles de la boussole oscillante (fabriquée à l'épisode précédent), pour différentes distances R de la lame. Mesure le temps que prend la boussole pour faire cinq oscillations complètes, à l'aide d'un chronomètre. La fréquence d'oscillation est le nombre d'oscillations (5) divisé par ce temps (en secondes).

On élimine la contribution du champ magnétique terrestre en éloignant d'abord tout objet en fer ou aimant de la boussole et en la laissant s'aligner. Ensuite, dans la direction de son alignement, on approche lentement le pôle Sud d'une pile d'aimants du pôle Sud de la boussole, jusqu'à ce que la boussole n'oscille plus. Prends tes mesures en déplaçant la lame et laisse la boussole fixe.

Considérons le pôle Sud de la lame, qui fait face à la boussole (**figure 3**). Ce pôle exerce une force F_N plus forte sur le pôle Nord de la boussole que la force F_S qu'il exerce sur son pôle Sud, du fait que le pôle Nord de la boussole est plus près de

Matériel requis

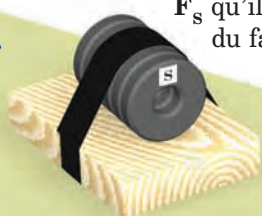
- la boussole oscillante fabriquée à l'épisode 1-9
- une lame de scie à métaux aimantée (épisode 1-8)
- une bouteille de shampooing et du ruban adhésif
- une règle
- une pile de nos petits aimants plats (6 à 8) avec un petit rectangle de bois pour les fixer
- une montre numérique avec une fonction

la lame. Lorsque la distance R entre la lame et la boussole est supérieure à environ trois fois la longueur de la boussole, on démontre que c'est la force moyenne F_m , des deux forces F_N et F_S , qui est proportionnelle à la fréquence d'oscillation au carré f^2 . Ainsi, pour obtenir la variation de F_m en fonction de la distance R , on traduira en graphique les chiffres obtenus pour f^2 en fonction de la distance R mesurée à partir du pivot de la boussole. C'est ce qui a été fait dans le graphique de la **figure 4**, pour six points expérimentaux. Une courbe variant comme $1/R^2$ (en jaune) est également représentée.

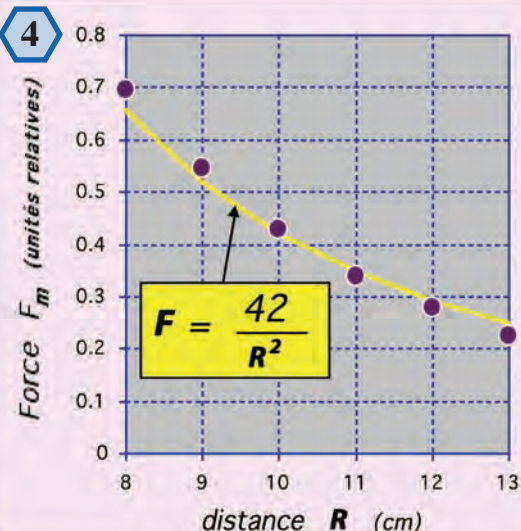
Pour des distances R inférieures à environ 12 cm, le pôle Nord de la lame exerce une influence négligeable (par rapport

à celle de son pôle Sud) sur l'oscillation de la boussole, dans le plan horizontal. Dans ces conditions, F_m représente une **bonne approximation de la force entre un pôle de la lame et un pôle de la boussole**.

3



4



Version domestique de l'expérience de Coulomb, pour évaluer la force exercée par un pôle magnétique sur un autre en fonction de leur distance, en mesurant la fréquence d'oscillation d'une petite aiguille aimantée.

Pour en savoir plus

- Collection de mémoires relatifs à la physique, publiée par la Société française de physique, tome 1. *Mémoires de Coulomb*, Gauthier-Villars, Paris, 1884. Nouvelle édition: Librairie scientifique et technique Albert Blanchard, Paris, 2002.

En l'an 1785

Un peu d'histoire

En 1785, **Coulomb** invente la «balance à torsion», un instrument de mesure ingénieux qui devait faire progresser la science sur plusieurs fronts. Il va l'utiliser pour mesurer les forces magnétiques (**présent épisode**) et également les forces électriques (**chapitre 2**). En 1798, Cavendish va, de son côté, employer une balance à torsion pour mesurer les forces gravitationnelles.

La torsion d'un fil

Dans son étude sur la torsion des fils (voir l'**épisode précédent**), **Coulomb** fait osciller en rotation différents cylindres suspendus au fil qu'il étudie. Cette oscillation est causée par la réaction de torsion du fil.

Coulomb remarque que les oscillations sont de même durée, peu importe leur amplitude. Connaissant bien les lois qui régissent le mouvement des corps, il en déduit que **la réaction de torsion du fil est proportionnelle à l'angle de torsion**. Par conséquent, si l'on veut tordre un fil d'un angle deux fois plus grand, il faudra appliquer une force deux fois supérieure. L'angle de torsion devient donc une mesure de la force.

La beauté de la chose est que le fil peut aussi bien être un fil de soie ultra-fin qu'un fil de fer d'un bon diamètre. Il est donc possible de mesurer toute une gamme de forces, de la plus faible à la plus forte. Il faut simplement s'assurer qu'en tordant le fil, on ne dépasse pas un certain angle limite de torsion, au-delà duquel les oscillations de torsion ne sont plus de même durée. Pour

certains fils minces, cet angle limite peut correspondre à plusieurs tours du fil sur lui-même.

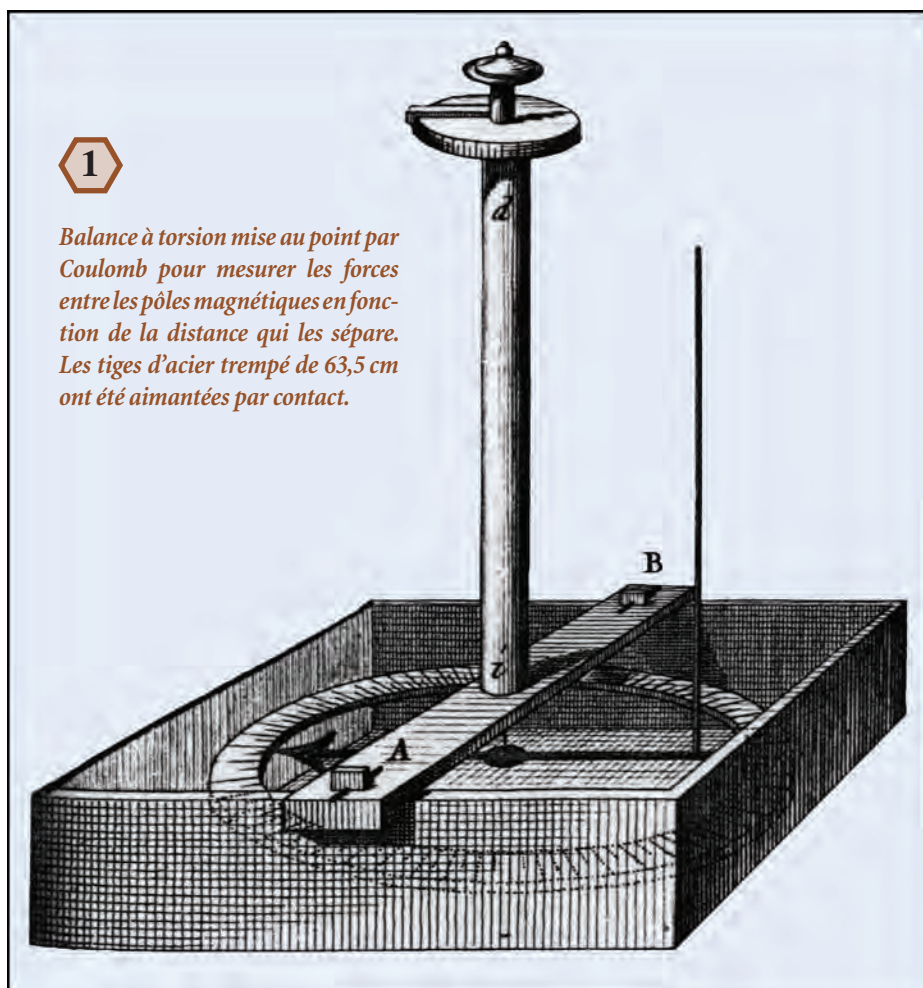
La balance à torsion magnétique

Pour la balance magnétique qu'il construit (**figure 1**), il utilise un fil de cuivre auquel il suspend une longue tige aimantée en position horizontale. Il dispose verticalement une autre tige aimantée et il mesure la force de répulsion entre les pôles semblables, qui se font face, en fonction de la distance qui les sépare.

Avant de mettre la tige verticale en place, l'instrument est ajusté pour que la tige horizontale soit alignée par le champ magnétique terrestre et que la torsion du fil soit nulle. Ensuite, **Coulomb** tord le fil, à l'aide du bouton en haut de la colonne, ce qui dévie la tige horizontale de son alignement. Il note l'angle de torsion du fil pour chaque angle de déviation de la tige suspendue. Il évalue ainsi la composante perpendiculaire à la tige de la force magnétique terrestre horizontale sur les pôles de la tige. Après ces mesures, il remet la torsion du fil à zéro.

En introduisant la tige aimantée verticale, les deux pôles semblables se repoussent. La tige horizontale tourne jusqu'à ce que la torsion du fil et la force magnétique terrestre contrebalancent la force de répulsion entre les deux pôles des tiges aimantées. Pour varier la distance entre les pôles, **Coulomb** tord le fil à l'aide du bouton en haut de la colonne. Connaissant la force magnétique terrestre qu'il a mesurée préalablement et l'angle de torsion du fil, il additionne les deux et obtient la force entre les pôles des deux tiges, pour une distance donnée. Puisque la force entre les pôles magnétiques diminue rapidement en fonction de la distance et que les tiges aimantées sont très longues, les forces qu'exercent les deuxièmes pôles de chacune des tiges aimantées sont négligeables.

Il confirme ainsi la loi qu'il avait trouvée par la méthode des oscillations (**épisode précédent**).



1

Balance à torsion mise au point par Coulomb pour mesurer les forces entre les pôles magnétiques en fonction de la distance qui les sépare. Les tiges d'acier trempé de 63,5 cm ont été aimantées par contact.

Au laboratoire

Suspend, comme sur la **figure 2**, une bouteille de shampoing, remplie aux deux tiers de sable ou de sel (un liquide amortirait trop les oscillations), au dossier d'une chaise en bois (pas en fer), à l'aide d'un bout de fil de cuivre de 0,7 mm de diamètre environ (de calibre 22 AWG). Utilise du fil pour électroaimant (avec une mince couche de vernis) ou dénude un mètre de fil électrique ordinaire.

Vérifie l'égalité des durées d'oscillation en chronométrant la durée de 5 oscillations, d'abord pour 1/8 de tour, et ensuite pour 1/4 de tour de la bouteille sur elle-même.

Ensuite, insère, au travers de la bouteille, une lame de scie à métaux aimantée (voir l'**épisode 1-8**). Pour mesurer l'angle de torsion, utilise une bande de papier, avec des marques à tous les centimètres, posée sur le rebord d'un seau en plastique de 15 à 18 cm de diamètre. Il faudra t'assurer (avec une règle) que la bouteille est bien centrée dans le seau et que la lame horizontale est libre de tourner. Laisse la lame s'aligner et tourne le seau pour que ta lame indique zéro.

Fixe une deuxième lame aimantée à une boîte de céréales, tel qu'illustré, de manière à présenter à l'un des pôles de la lame horizontale un pôle semblable. Finalement, insère une règle de plastique au travers de la boîte de céréales, pour mesurer la distance entre les pôles.

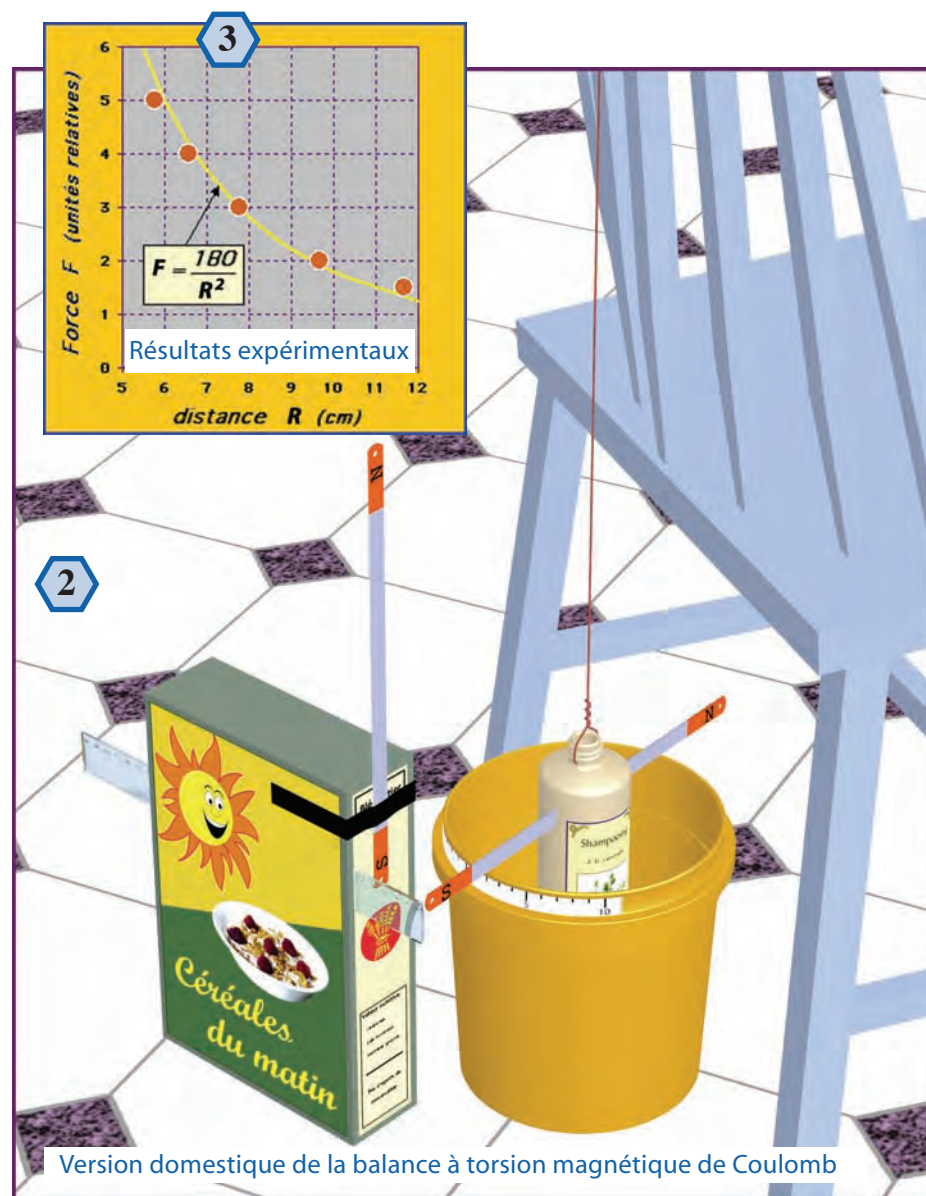
L'expérience consiste à noter la distance R entre les pôles (en cm sur la règle) pour différents angles de torsion (marques sur la bande de papier). La force exercée étant proportionnelle à l'angle de torsion, en traduisant en graphique tes valeurs lues sur la bande de papier en fonction de la distance lue sur la règle, tu obtiendras la variation de la force F entre les deux pôles, en fonction de la distance entre les pôles. C'est ce qui a été fait dans la **figure 3**, où une courbe variant comme $1/R^2$ (en jaune) est également représentée.

Dans la présente expérience, on peut démontrer que, pour des distances inférieures à 12 cm entre les pôles qui se font face, l'influence des deuxièmes pôles des lames aimantées et l'action du champ magnétique terrestre sont environ 20 fois moindres que la force qu'on étudie. Par conséquent, pour simplifier, nous négligerons ces influences.

Par ailleurs, il est important de ne pas trop approcher l'un de l'autre les pôles qui se font face, afin d'éviter qu'ils se désaimantent mutuellement (les forces magnétiques augmentent en rapprochant les pôles). Garde toujours entre eux une distance supérieure à cinq centimètres.

Matériel requis

- un mètre de fil de cuivre de 0,7 mm de diamètre (cal. 22 AWG)
- 2 lames de scie à métaux aimantées de 30 cm
- une bouteille de shampoing de 20 cm de haut
- une boîte de céréales
- un seau en plastique de 15 à 18 cm de diamètre
- une règle en plastique
- du ruban adhésif
- une chaise en bois
- un chronomètre



Pour en savoir plus

- Collection de mémoires relatifs à la physique, publiée par la Société française de physique, tome 1. *Mémoires de Coulomb*, Gauthier-Villars, Paris, 1884. Nouvelle édition: Librairie scientifique et technique Albert Blanchard, Paris, 2002.

De 1722 à aujourd'hui

Un peu d'histoire

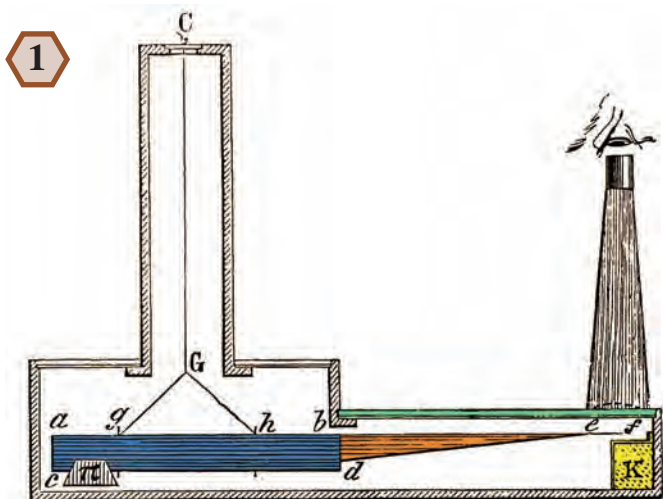
Nous avons vu (épisode 1-1) que **Christophe Colomb** avait observé des changements graduels dans la direction de pointage de sa boussole, tout au long de son parcours transatlantique. L'angle que fait l'aiguille de la boussole avec la direction du nord géographique dépend donc de l'endroit où l'on se trouve sur la Terre.

Compte tenu de l'importance de la boussole pour la navigation, il devenait impératif de mesurer cet angle (appelé « **déclinaison magnétique** ») avec précision à différents endroits sur la planète.

Cycles journaliers et annuels

Pour effectuer ces mesures avec précision, on suspendait une aiguille ou un barreau aimanté par un mince fil de soie.

La **figure 1** nous montre un tel instrument mis au point par **Coulomb** en 1777. Le barreau aimanté (en bleu) est prolongé par une fine lame de cuivre (en orangé) dont la pointe, très fine, arrive au-dessus d'une échelle graduée (en jaune). L'enceinte, qui protège des courants d'air, est pourvue d'une vitre (en vert). Les mesures se font à l'aide d'une petite lunette d'approche.



Appareil conçu par Coulomb, en 1777, pour étudier les variations de la déclinaison magnétique.

En accordant beaucoup de soin à la mesure de la déclinaison magnétique, **Graham** a observé, dès 1722, que l'aiguille aimantée variait faiblement son orientation, de façon analogue à chaque jour, démontrant ainsi un cycle journalier.

Plus tard, en 1784, **Cassini** met en évidence un cycle annuel dans l'orientation de l'aiguille aimantée.

Au fil des années, on a perfectionné la sensibilité et l'automatisation de telles mesures, comme on peut l'apprécier en examinant l'appareil illustré sur la **figure 2**. Cet appareil, qui remonte aux années 1870, comporte plusieurs innovations techniques. Tout d'abord, l'enceinte qui entoure le barreau aimanté (en bleu) est vidée de son air pour éviter toute turbulence. Un petit miroir (en vert), fixé au barreau aimanté, tourne avec lui tout en réfléchissant un faisceau de lumière qui provient de la lampe à gaz. Le faisceau réfléchi traverse un tube de bois avant d'entrer dans un boîtier étanche (non visible sur la figure). Ce boîtier contient un rouleau de papier photographique entraîné verticalement par un mécanisme à ressort. Ce dispositif permet d'enregistrer, de façon continue, les déviations du barreau aimanté. Plus

la distance entre le miroir et le papier photographique est grande et plus la mesure est précise.

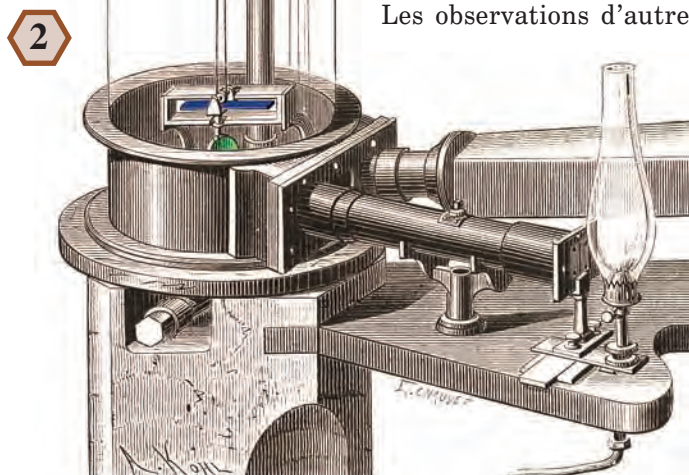
C'est à l'aide d'un appareil semblable que les courbes de la **figure 3** ont été obtenues. Ces courbes représentent des mesures effectuées à Paris, aux environs de 1875, sur les variations journalières de la déclinaison magnétique, pour différents mois de l'année. À cette époque, à Paris, l'aiguille de la boussole pointait 17 degrés à l'ouest du nord géographique (déclinaison magnétique = 17° ouest). Dans cette figure, l'axe vertical s'étale de 17°12' à 17°26' (1' = une minute d'angle = 1/60 degré).

Les savants ont vite compris que la présence d'un cycle journalier et d'un cycle annuel signifie que le Soleil est à l'origine de ces perturbations.

Des orages magnétiques

En plus des cycles réguliers dont nous venons de parler, à certains moments l'aiguille aimantée s'affolait littéralement, en présentant des variations rapides pouvant aller jusqu'à un degré en quelques secondes.

En 1741, deux savants suédois, **Hiorter** et **Celcius d'Upsala**, font remarquer que ces « affolements magnétiques » se produisent en même temps que les aurores boréales (voir la **figure 4**). Les observations d'autres



Appareil des années 1870 conçu pour mesurer et enregistrer les variations de la déclinaison magnétique.

scientifiques, dans les années qui suivirent, vont confirmer la réalité de cette coïncidence. C'est d'ailleurs en raison de l'analogie entre les aurores boréales et les orages (deux phénomènes lumineux dans le ciel) que le savant allemand **Humboldt** introduisit, au début du 19^e siècle, l'expression «**orage magnétique**» pour décrire ces périodes d'affolement des aiguilles de boussole.

Le lien entre les orages magnétiques et le Soleil est apparu en 1852 alors que trois savants, **Sabine**, **Gautier** et **Wolf**, établissent presque simultanément une corrélation étroite entre la fréquence des orages magnétiques et le nombre de taches solaires. Ces dernières étaient observées, par les astronomes, en projetant l'image agrandie du Soleil sur un mur à l'aide d'un télescope.

Le vent solaire

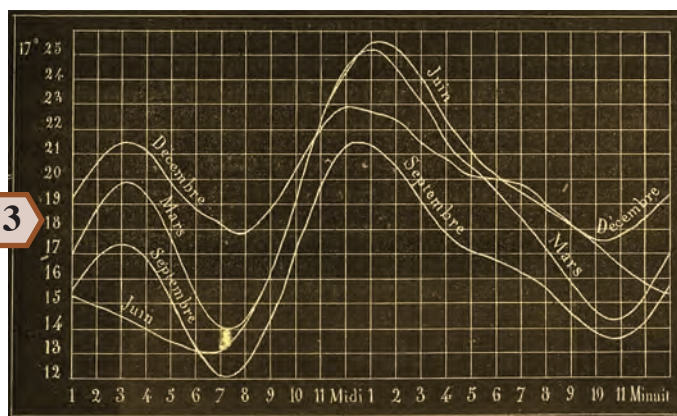
Mais comment le Soleil pouvait-il produire les perturbations magnétiques et les aurores boréales ?

C'est l'observation minutieuse de la queue des comètes, dans le ciel, qui allait conduire à la solution. Les astronomes savaient que la queue des comètes pointe toujours dans la direction opposée à celle du Soleil, tout au long de leur trajectoire autour de celui-ci. Tout se passe comme si un «vent», en provenance du Soleil, soufflait sur de minuscules débris (ou du gaz) qui se détachent de la comète pour produire la queue.

On a longtemps pensé que la lumière émise par le Soleil constituait ce «vent». Mais des observations plus poussées, au début du 20^e siècle, ont démontré que certaines comètes présentaient des queues dont la forme et la couleur ne pouvaient s'expliquer par cette hypothèse. En 1943, l'Allemand **Hoffmeister** propose donc qu'en plus de la lumière, le Soleil pourrait émettre des particules.

La présence de ces particules constituant le «**vent solaire**» sera confirmée dans les années 1960 à l'aide de sondes spatiales qui établiront leur nature et mesureront leurs vitesses. On sait donc aujourd'hui que le vent solaire est constitué principalement de noyaux d'hydrogène et d'hélium (les deux principaux constituants du Soleil), de même que d'électrons. Ces particules, chargées électriquement, nous arrivent avec une vitesse moyenne de 400 km/sec. Mais, parfois, d'énormes explosions à la surface du Soleil projettent des salves très intenses de ces particules, qui nous parviennent alors en plus grand nombre et avec plus d'énergie. La fréquence et l'ampleur de ces événements explosifs s'accroissent lorsque le nombre de taches solaires augmente.

Or, comme nous le verrons dans le prochain volume de cette série, des particules électriques en mouvement interagissent avec le champ magnétique de la Terre. Ce dernier va les concentrer là où le champ magnétique est plus intense, c'est-à-dire aux pôles. C'est en entrant en collision avec les molécules de l'air, au-dessus des pôles, que les particules du vent solaire produisent ces merveilleux phénomènes lumineux que sont les aurores boréales (au



Variations journalières de la déclinaison magnétique à Paris aux environs de 1875, pour différents mois de l'année.



Illustration d'une aurore boréale en Norvège le 19 janvier 1839.



Les lignes du champ magnétique terrestre sont modifiées et rendues asymétriques sous l'influence du vent solaire (illustration de Steele Hill – SOHO/NASA).

pôle Nord) et australes (au pôle Sud). En plus de produire ces spectacles de lumière, le vent solaire déforme les lignes du champ magnétique terrestre (voir la **figure 5**). Celles-ci perdent alors leur symétrie et influencent différemment l'aiguille aimantée de la boussole à différents moments de la journée et de l'année.

Pour en savoir plus

- *Mémoires relatifs à la physique*, C. A. COULOMB, Librairie scientifique et technique, Albert Blanchard, Paris, 2002.
- *Le monde physique: Le magnétisme et l'électricité*, Amédée GUILLEMIN, Librairie Hachette et Cie, Paris, 1883.
- Excellent site Internet éducatif sur la magnétosphère terrestre : www-istp.gsfc.nasa.gov/Education/Intro.html

En l'an 1832

Un peu d'histoire

L'étude du magnétisme terrestre suscitait beaucoup d'intérêt au début du 19^e siècle, autant pour la navigation que pour les mystérieux orages magnétiques et les aurores polaires (voir l'épisode 1-12).

Mesures de direction

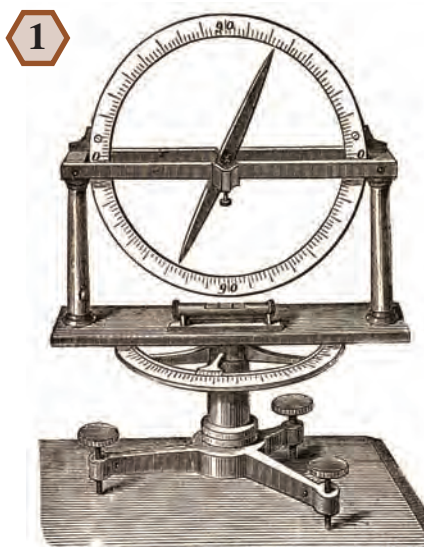
La mesure de la direction du champ magnétique terrestre ne posait pas de problème. Une boussole traditionnelle permettait d'obtenir la **déclinaison magnétique** (épisode 1-1), alors qu'une boussole d'inclinaison (figure 1) donnait l'**inclinaison magnétique** (épisode 1-5). Il est à remarquer que dans une boussole traditionnelle de précision, on place un petit contrepoids pour que l'aiguille se maintienne à l'horizontale.

Mesures d'amplitude

La mesure de l'amplitude du champ magnétique terrestre posait toutefois un problème avant que l'Allemand **Carl Friedrich Gauss** (figure 2) y apporte une solution, en 1832.

Pour comparer l'amplitude du champ magnétique à différents endroits sur la planète, la méthode employée, avant 1832, consistait à faire osciller l'aiguille aimantée d'une boussole d'inclinaison (figure 1). Ce type de boussole permettait d'aligner une aiguille aimantée dans la vraie direction du champ magnétique terrestre. On alignait d'abord le cercle vertical parallèle à l'aiguille d'une boussole ordinaire. La mesure de la durée t d'une oscillation de l'aiguille de la boussole d'inclinaison permettait d'obtenir l'amplitude du champ magnétique (épisode 1-10).

Le problème est que cette méthode nécessite d'effectuer les mesures avec la même aiguille aimantée, en voyageant autour du monde. Ce n'est pas très pratique, sans compter que l'aiguille peut se désaimanter et fausser les mesures du champ magnétique terrestre. C'est malgré tout ce qu'a fait le naturaliste allemand **Humboldt** au début du 19^e siècle, au



Boussole d'inclinaison du 19^e siècle (référence A16, Livres rares, bibliothèque de l'Université Laval, Québec).



Carl Friedrich Gauss, 1777-1855 (Musée de la civilisation, bibliothèque du Séminaire de Québec. Portrait dans *Electrical World*, New York, sept. 14, 1895).

cours de ses nombreux voyages. Il a ainsi démontré que l'amplitude du champ magnétique terrestre augmente en se dirigeant vers les pôles.



3

Technique inventée par Gauss, en 1832, pour la mesure ultra-précise des angles de déviation d'un barreau aimanté suspendu.

Plus de précision

Pour mener à terme sa méthode de mesure absolue du champ magnétique terrestre, **Gauss** devait pouvoir mesurer avec précision de très petits angles de déviation d'un barreau aimanté suspendu.

La figure 3 illustre la technique ingénieuse inventée par notre célèbre mathématicien et physicien de Göttingen. L'astuce consiste à fixer un miroir sur le barreau aimanté et à utiliser une lunette astronomique. Avec celle-ci, l'expérimentateur observe une règle finement graduée, située juste sous la lunette, par l'intermédiaire du miroir. La moindre déviation du barreau déplace la région d'observation de la règle telle que vue dans la lunette. Un mince cheveu vertical à l'intérieur de la lunette est imagé sur la règle et permet d'obtenir une mesure très fine. Avec ce système, **Gauss** pouvait mesurer des angles de l'ordre d'une seconde d'arc (1/3 600 degré)!

Les déviations d'un barreau aimanté dans un plan horizontal allaient permettre d'obtenir la composante horizontale du champ magnétique. L'angle donné par la boussole d'inclinaison permettait d'en déduire la composante verticale.

Une mesure absolue

Pour ce qui suit, réfère-toi à l'**épisode 1-10** décrivant la méthode des oscillations de **Coulomb**. Cet illustre savant utilisait l'équation suivante pour la durée t d'une oscillation d'un barreau aimanté suspendu :

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{J}{H ML}}$$

où $\pi = 3,14159\dots$, H est l'amplitude de la composante horizontale du champ magnétique terrestre, J est le «**moment d'inertie**» du barreau, M représente la quantité de fluide magnétique (appelée «**masse magnétique**») dans chacun des pôles du barreau, et L symbolise la distance entre ces deux pôles magnétiques. Le moment d'inertie J du barreau dépend de sa masse et de sa forme, et peut être mesuré. En mesurant t il ne reste plus comme inconnues que H et le produit ML que **Coulomb** définit comme le «**moment magnétique**» du barreau. Notons, de plus, que le produit HM correspond à l'amplitude de la force horizontale exercée par la Terre sur chacun des pôles du barreau.

Gauss comprend que pour effectuer des mesures absolues de H , indépendantes du moment magnétique ML du barreau, il lui faut connaître ML . Mais, avec une seule équation, il ne peut trouver deux inconnues. Il a donc besoin d'une deuxième relation entre H et ML .

Pour obtenir cette relation, il place une aiguille aimantée dans le prolongement du barreau aimanté, alors que celui-ci est horizontal et perpendiculaire au champ magnétique terrestre (**figure 4**). En l'absence du barreau, l'aiguille s'aligne dans la direction de la ligne pointillée. Lorsqu'on introduit le barreau, l'aiguille dévie d'un angle θ . La mesure de cet angle permet de comparer l'amplitude des deux forces en jeu (force magnétique terrestre horizontale et force magnétique du barreau) sur chacun des pôles de l'aiguille.

L'amplitude de la force magnétique horizontale $|F_H|$ exercée par la Terre sur un pôle de l'aiguille est

$$|F_H| = H m$$

où m symbolise la **masse magnétique** d'un pôle de l'aiguille aimantée.

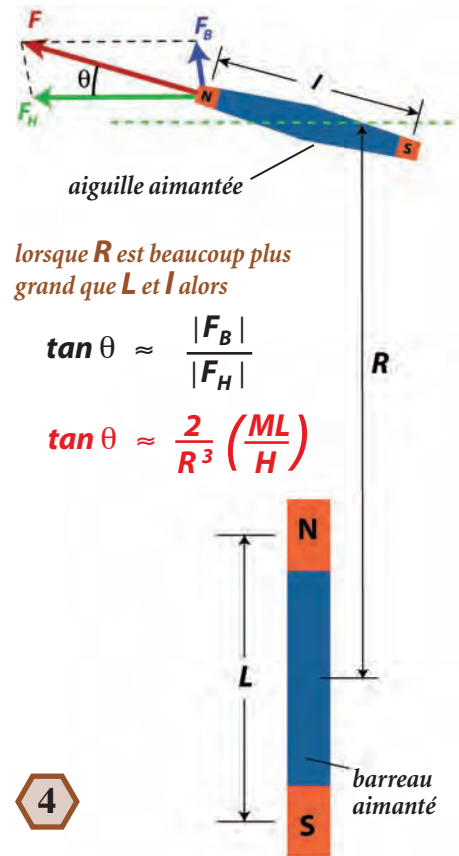
Pour obtenir l'amplitude de la force $|F_B|$ exercée par le barreau aimanté sur un pôle de l'aiguille, **Gauss** utilise la loi de **Coulomb** exprimant la force entre deux pôles magnétiques, en posant $k=1$ (voir l'**épisode 1-10**). Il démontre que pour un pôle situé dans le prolongement de l'axe du barreau, $|F_B|$ se réduit à

$$|F_B| \approx \left(\frac{2 ML}{R^3} \right) m$$

si la distance R entre le barreau aimanté et le pôle considéré est beaucoup plus grande que la distance L entre les pôles du barreau. $|F_B|$ représente en fait la contribution des deux pôles contraires du barreau.

L'expression en rouge dans la **figure 4** constitue la deuxième relation tant recherchée entre ML et H . Pour obtenir H , il faut prendre plusieurs mesures de R et de θ , et utiliser l'équation exprimant la durée t d'une oscillation du barreau.

Le barreau devant être loin de l'aiguille, les angles de déviation θ sont faibles (inférieurs à deux degrés) et on comprend que **Gauss** ait dû concevoir



lorsque R est beaucoup plus grand que L et l alors

$$\tan \theta \approx \frac{|F_B|}{|F_H|}$$

$$\tan \theta \approx \frac{2}{R^3} \left(\frac{ML}{H} \right)$$

Expérience de Gauss pour obtenir une deuxième relation entre ML et H .

une technique de mesure précise des petits angles (**figure 3**).



Observatoire magnétique construit pour Gauss à Göttingen en 1833 (référence A3, volume 3, Livres rares et collections spéciales, Direction des bibliothèques, Université de Montréal).

Pour en savoir plus

- Gauss and Weber's Creation of the Absolute System of Units in Physics, Andre KOCH TORRES ASSIS et al., dans la revue 21st Century Science & Technology, automne 2002, p. 40 à 48.
- Electrodynamics from Ampère to Einstein, Olivier DARRIGOL, Oxford University Press, Oxford, 2000.
- Intensitas vis magneticæ terrestris ad mensuram absolutam revocata (en latin), Carl Friedrich GAUSS, Carl Friedrich Gauss Werke, p. 11 à 118, Göttingen, 1877.

Un peu d'histoire

La pierre d'aimant, qui est en fait un minéral d'oxyde de fer appelé **magnétite**, constitue un aimant naturel.

Niveau 2

Les premiers aimants artificiels

Les premiers aimants artificiels ont été les morceaux de fer aimantés par contact avec des pierres d'aimant, dans l'Antiquité.

Au Moyen-Âge, les marins utilisaient des boussoles dont l'aiguille en fer était aimantée en la frottant sur les pôles d'une pierre d'aimant. Mais cette aimantation est très fragile et les pilotes de bateaux devaient garder une pierre d'aimant pour « réaimanter » régulièrement l'aiguille de leur boussole.

L'acier trempé

Avec le développement de la métallurgie, on a fabriqué de l'acier en mélangeant du fer avec environ 1% de carbone. L'acier pouvait être rendu beaucoup plus rigide que le fer en le trempant, c'est-à-dire en le refroidissant rapidement dans un liquide après l'avoir chauffé à blanc. Or, l'acier trempé s'est avéré bien meilleur que le fer pour conserver l'aimantation.

Techniques d'aimantation

En 1777, **Coulomb** découvre que les lames d'acier minces et larges s'aimantent plus fortement que les autres formes (**épisode 1-9**).

Lorsque **Oersted** découvre, en 1820, que les courants électriques ont des effets magnétiques (**volume 2**), **Arago** et **Ampère** démontrent aussitôt qu'on peut aimanter une tige d'acier en la plaçant dans un solénoïde en cuivre parcouru par un courant électrique (**figure 2**). Dès lors, c'est la technique d'aimantation qu'on va préférer.

Dans les années 1860, le physicien français **Jamin** étudie en détail le magnétisme des aimants constitués de rubans d'acier recourbés (**figure 1**). On

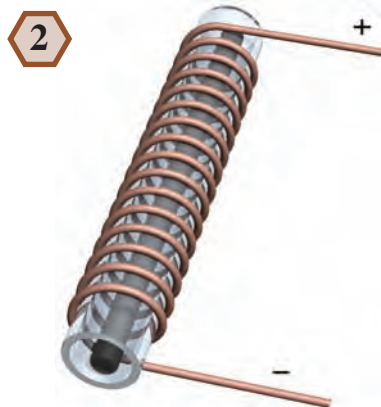


1



Variété d'aimants artificiels. À gauche, des aimants faits de lames ou de rubans d'acier aimantés, en forme de barre et de fer à cheval, munis d'armatures en fer aux pôles, tels qu'on les fabriquait au 19^e siècle. À droite, des aimants modernes en alnico (rouge et jaune), en ferrite (gris-brun foncé) et au néodyme (argentés).

sait déjà que des armatures en fer sur les pôles renforcent le magnétisme des aimants (**épisode 1-4**). Ce que **Jamin** démontre, c'est l'importance d'avoir ces armatures en place lors de l'aimantation des rubans d'acier, de même qu'une pièce de fer faisant le contact entre les deux armatures. L'aimantation se fait alors dans un « circuit magnétique fermé », ce qui la renforce. En procédant de la sorte, il construit les aimants les plus puissants de l'époque, capables de supporter dix fois leur poids.



Aimantation d'une tige d'acier par un courant solénoïdal issu d'une pile électrique, non visible sur la figure. Le tube de verre permet d'isoler le fil de cuivre de la tige d'acier.

Le champ magnétique

Pour comparer les performances de différents aimants, il faut faire appel à la notion de **champ magnétique**. Comme nous l'avons vu à l'**épisode 1-7**, les lignes du champ magnétique ont des formes en anneaux et correspondent aux figures dessinées par des parcelles de fer saupoudrées autour des aimants.

En plaçant de petites boussoles autour des aimants, leurs aiguilles aimantées s'alignent dans la direction des lignes du champ magnétique. Dans l'**épisode 1-9**, nous avons introduit des flèches sur ces lignes pour indiquer le sens dans lequel pointe le pôle Nord magnétique d'une aiguille aimantée.

En fait, les lignes du champ magnétique définissent la direction et l'amplitude de la force magnétique sur un pôle Nord magnétique. Un pôle Sud de même intensité subit une force égale à celle du pôle Nord, mais dans le sens contraire. L'amplitude de la force sur les pôles est proportionnelle à la densité des lignes du champ magnétique.

Aujourd'hui, les unités utilisées pour mesurer le champ magnétique sont le **Gauss** ou le **Tesla**. Pour fixer les idées, disons que le champ magnétique moyen à la surface de la Terre est de 0,5 Gauss. Par ailleurs, 1 Tesla vaut 10 000 Gauss.

Champ maximum et champ de désaimantation

Lorsqu'on veut caractériser la performance d'un aimant, on pense naturellement à la valeur maximale du champ magnétique qu'il peut produire. Toutefois, pour un matériau donné, cette valeur maximale dépend fortement de la forme qu'on donne à l'aimant. Les ingénieurs ont donc convenu d'utiliser la forme qui donne le champ magnétique le plus fort, soit celle d'un anneau, avec une petite ouverture (**figure 3**).

Après l'aimantation de cet anneau, le champ magnétique qu'on mesure entre les pôles est ce qu'on appelle le **champ magnétique rémanent**. C'est le **champ magnétique maximum** que peut produire un aimant constitué d'un matériau donné. Cette valeur constitue un paramètre très utilisé pour caractériser les aimants. On le retrouve dans le tableau comparatif de la **figure 4**.

Un bon aimant doit non seulement produire un champ magnétique intense, mais il doit également être difficile à désaimanter.

Pour désaimanter un aimant, on peut le plonger dans un champ magnétique extérieur suffisamment intense, dont le sens est contraire à son aimantation. Nous appellerons **champ magnétique de désaimantation** la valeur du champ requise pour ce faire. C'est un autre paramètre important pour caractériser les aimants, que l'on retrouve dans la **figure 4**.

Pour fixer les idées, sache que pour désaimanter une pierre d'aimant, il faut un champ de désaimantation de 200 Gauss environ, alors que pour désaimanter un barreau de fer, 1 Gauss suffit. Les aimants en acier au carbone nécessitent approximativement 10 Gauss pour se désaimanter.

Les nouveaux matériaux

En 1897, **Marie Curie** étudie différents alliages d'acier dans lesquels elle ajoute du tungstène, du chrome ou du molybdène. Elle trouve que les aimants fabriqués avec ces aciers sont plus résistants puisque leur champ magnétique de désaimantation est de 80 Gauss.



Le champ magnétique maximum que peut produire un aimant est celui qu'on obtient en donnant à cet aimant la forme d'un anneau, avec une petite ouverture. Les deux pôles de l'aimant sont alors l'un en face de l'autre, et le champ magnétique prend sa valeur maximale entre les deux pôles.

Pour les matériaux magnétiques développés au 20^e siècle, et que nous allons décrire maintenant, reporte-toi au tableau de la **figure 4** pour connaître leur **champ magnétique maximum** et leur **champ magnétique de désaimantation**.

En 1917, les chercheurs japonais **Honda** et **Takai** découvrent qu'en ajoutant du cobalt à un acier au tungstène, on améliore sa résistance à la désaimantation. Les **aciers au cobalt** sont très durs. On les utilise, entre autres, dans la fabrication d'outils pour travailler le métal (lames de scie, forets de perceuse...).

En 1931, le métallurgiste japonais **Tokohichi Mishima** met au point un acier qui contient de l'aluminium, du nickel et du cobalt. Cet acier conduira, par son perfectionnement dans les années 1930, à ce qu'on appelle l'**alnico**.

En 1952, les chercheurs de la compagnie **Phillips** développent les

premiers aimants en **ferrite** commerciaux, qui résistent trois fois plus à la désaimantation que l'alnico. Leur **champ magnétique maximum** est toutefois inférieur (**figure 4**). Malgré cela, les aimants en ferrite sont les plus répandus de nos jours, en raison de leur faible coût (**figure 5**). Deux catégories existent : les aimants en **ferrite ordinaire** (isotrope) et les aimants en **ferrite polarisée** (anisotrope).

En 1966, le chercheur américain **Karl J. Strnat** découvre les très bonnes performances magnétiques d'un composé de samarium et de cobalt. En 1972, lui et **Alden Ray** découvrent un deuxième composé **samarium-cobalt** encore plus performant. Ce sont les performances de ce dernier matériau que tu retrouves dans le tableau de la **figure 4**. Malheureusement, le coût de ces aimants est très élevé. Aussi, on les retrouve principalement dans les applications spatiales et militaires, où leur résistance à la température et à la corrosion est recherchée (**figure 5**).

Le dernier-né des matériaux magnétiques, servant à la fabrication des aimants, est un composé **néodyme-fer-bore** qui a fait son apparition en 1983, chez **General Motors** et **Sumitomo**. C'est le champion des aimants, pour les températures inférieures à 150 °C. Afin de pallier leur faible résistance à la corrosion (**figure 5**), on revêt ces aimants d'une couche de nickel qui leur donne un aspect métallique argenté. On les retrouve, entre autres, dans les moteurs des disques durs et ceux des lecteurs CD/DVD de nos ordinateurs.

Les **aimants flexibles** sont fabriqués à partir d'un mélange de poudres magnétiques et de résines.

4	TYPE D'AIMANT	CHAMP MAGNÉTIQUE maximum produit (Gauss)	CHAMP MAGNÉTIQUE de désaimantation (Gauss)
	Acier au cobalt	8 500	200
	Alnico	10 500	650
	Ferrite ordinaire	2 300	2 000
	Ferrite polarisée	4 000	3 000
	Samarium-cobalt	10 500	9 500
	Néodyme-fer-bore	12 000	11 500

Comparaison des propriétés magnétiques de différents matériaux dont sont faits les aimants. Le « champ magnétique maximum produit » et le « champ magnétique de désaimantation » sont définis dans le paragraphe intitulé « Champ maximum et champ de désaimantation ».

Des piles d'aimants

Les aimants en ferrite ou au néodyme prennent souvent la forme d'un disque. Afin d'avoir une meilleure idée des performances qu'on peut obtenir avec de tels aimants, nous avons utilisé plusieurs aimants discoïdaux de 2,5 cm de diamètre et construit des piles de différentes hauteurs. Nous avons ensuite mesuré le champ magnétique au bout des piles, pour ces deux types d'aimants. Les résultats sont présentés sur la **figure 6** ci-contre.

ATTENTION avec les aimants

Il ne faut pas approcher les aimants de disques magnétiques pour ordinateur ou de cartes avec une bande magnétique, car l'information qu'ils contiennent serait perdue. Ne les approche pas non plus d'un écran de télévision ou d'ordinateur ni d'une montre, car cela pourrait les endommager de façon irréversible.

Les aimants au néodyme sont trop forts pour être utilisés par des enfants. Ces aimants pourraient leur occasionner des blessures si un doigt (ou de la peau) restait coincé entre deux d'entre eux.

Niveau 3

Pouvoir de levage

Un aimant en ferrite de 25 mm de diamètre et de 6,4 mm d'épaisseur peut supporter une masse de fer de 250 grammes, alors qu'un aimant au néodyme ayant les mêmes dimensions peut supporter une masse 25 fois supérieure, pour un champ magnétique 5 fois plus élevé (**figure 6**).

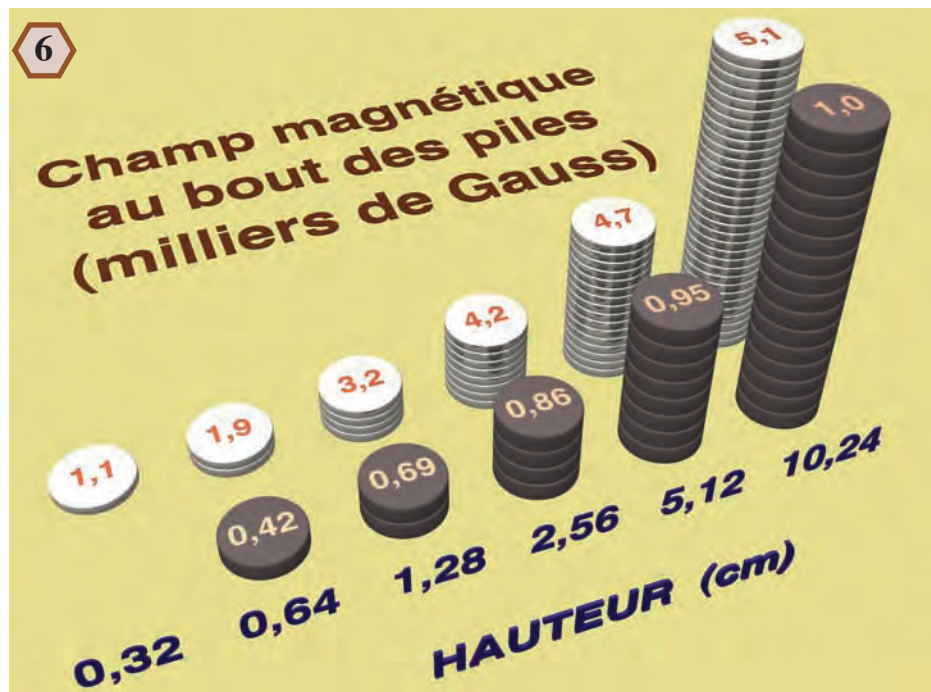
En fait, l'expérience nous démontre que le «pouvoir de levage» est proportionnel au carré du champ magnétique, pour une même surface de contact aimant-fer.

L'excitation magnétique

Dans les informations techniques des fabricants d'aimants, on utilise l'expression **excitation magnétique**

5	TYPE D'AIMANT	COÛT	TEMPÉRATURE maximale d'utilisation	RÉSISTANCE À LA CORROSION
	Acier au cobalt	bas	100°C	bonne
	Alnico	modéré	550°C	bonne
	Ferrite ordinaire	bas	250°C	excellente
	Ferrite polarisée	modéré	250°C	excellente
	Samarium-cobalt	très élevé	300°C	excellente
	Néodyme-fer-bore	élevé	150°C	faible

Autres critères permettant de choisir le bon type d'aimant pour une application donnée.



Comparaison du champ magnétique produit par des piles d'aimants de différentes hauteurs, pour deux types d'aimants : des aimants au néodyme (argentés) et des aimants en ferrite ordinaire (bruns). Les aimants sont des disques de 2,5 cm de diamètre et de 3,2 mm d'épaisseur pour ceux au néodyme, ou 6,4 mm d'épaisseur pour ceux en ferrite. Le champ magnétique a été mesuré au centre de la surface supérieure des piles, là où le champ magnétique est à son maximum, à l'aide d'un gaussmètre LakeShore modèle 420, dans les laboratoires du professeur Louis Taillefer de l'Université de Sherbrooke, au Québec. Nous le remercions pour sa collaboration.

coercitive plutôt que *champ magnétique de désaimantation*. L'expression «**excitation magnétique**» fait référence à un champ magnétique extérieur produit par des courants électriques qui «excitent» les molécules de l'aimant, pour les aimanter ou les désaimanter. Pour distinguer d'avantage l'origine électrique de ce champ

magnétique extérieur, on a même donné un nom différent à l'unité d'excitation magnétique, soit l'**Oersted** au lieu du **Gauss**. Toutefois, une excitation magnétique de 1 Oersted a le même effet magnétique qu'un champ magnétique de 1 Gauss.

Pour en savoir plus

- *Driving Force*, James D. LIVINGSTON, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1996.
- Divers sites Internet de fournisseurs d'aimants, dont AMF magnetics (www.magnet.au.com), Eclipse magnetics (www.eclipse-magnetics.co.uk) et FORCEFIELD (www.wondermagnet.com).
- *Les aimants permanents*, G. LACROUX, Éditions Tec & Doc, Paris, 1989 (ouvrage spécialisé).

Un peu d'histoire

Un aimant est dit permanent lorsqu'il n'a pas besoin d'une excitation extérieure constante pour garder son magnétisme.

La boussole

La plus ancienne application des aimants permanents est évidemment la boussole. C'est elle qui a permis aux grands explorateurs de découvrir de nouveaux continents.

Moteurs et haut-parleurs

Les deux applications modernes les plus importantes des aimants sont les moteurs électriques et les haut-parleurs. Ces applications font appel aux forces entre les courants électriques et les aimants, que nous découvrirons dans le volume 2.

Des senseurs magnétiques

Dans ce deuxième volume, nous verrons également que depuis 1980 environ, les aimants sont utilisés de plus en plus avec des senseurs à **effet Hall** qui détectent la présence d'un aimant. Si tu as un système d'alarme chez toi, il y a un senseur dans le cadre des portes extérieures et un aimant fixé sur le côté des portes. Lorsqu'une porte s'ouvre, l'aimant s'éloigne du senseur et l'alarme se déclenche.

Bien fixés

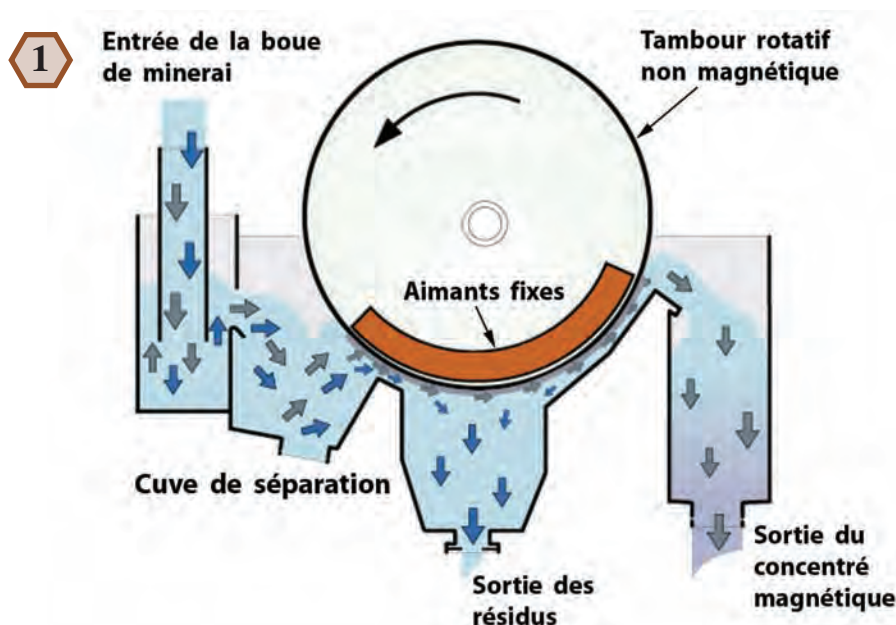
Tu as probablement des aimants chez toi pour tenir des notes ou des photos sur le réfrigérateur. Il y a de bonnes chances également pour que tu aies des aimants dans certaines armoires ou certains meubles, pour maintenir leurs portes fermées. Une plaquette de fer est alors vissée dans la porte, en face de l'aimant.

Séparation magnétique

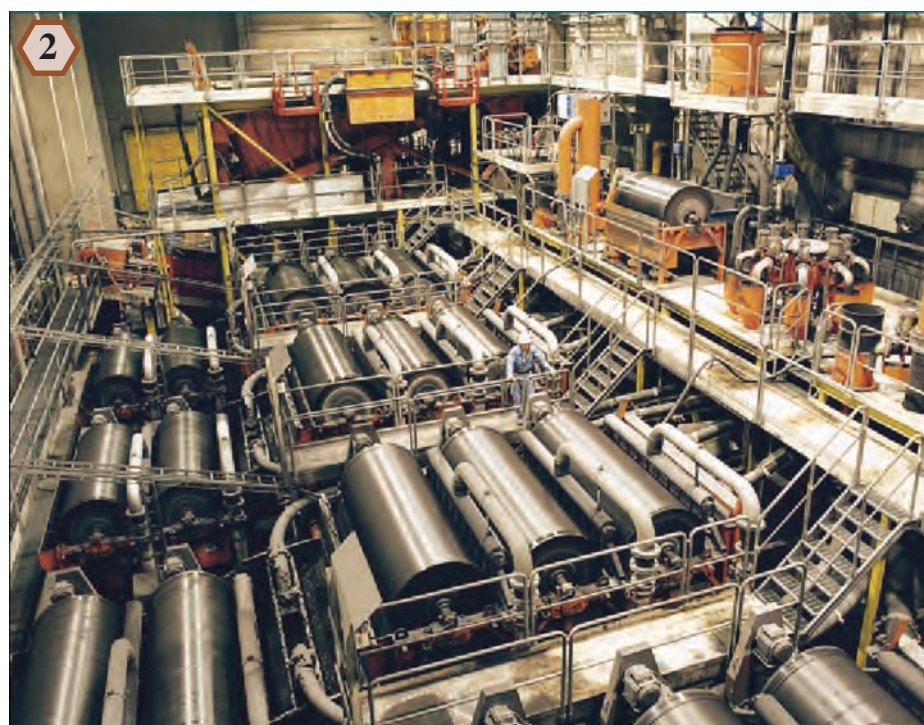
Les aimants permanents sont particulièrement utiles dans l'industrie minière. On les retrouve, en effet, dans des systèmes de purification des minerais de fer.

On broie d'abord le minerai en fines particules que l'on mélange à de l'eau pour former une boue. On injecte alors cette boue dans un séparateur magnétique à tambour rotatif, dont le fonctionnement est illustré dans la **figure 1**.

La **figure 2** nous montre une salle de traitement des minerais ferreux où on utilise des séparateurs magnétiques fonctionnant selon le principe illustré dans la **figure 1**.



Fonctionnement d'un séparateur magnétique à tambour rotatif. Le tambour est en acier inoxydable non magnétique et les aimants sont stationnaires (courtoisie de Metso Minerals).



Salle des séparateurs magnétiques dans une installation de traitement des minerais ferreux (courtoisie de Metso Minerals).

CHAPITRE 2

L'électricité statique

L'électricité est dite statique lorsqu'elle s'accumule sur les corps à la suite d'un frottement ou d'un autre procédé. Par opposition, l'électricité dynamique est celle qui circule dans les fils électriques de nos maisons, sous la forme du courant électrique.

Nous avons vu à l'épisode 0-1 que Thalès de Milet a généré de l'électricité statique, dans l'Antiquité, en frottant un morceau d'ambre sur une étoffe de laine. L'ambre frotté manifeste alors un pouvoir mystérieux d'attraction sur des petits morceaux d'herbe ou de paille.

Mais l'ambre n'est pas le seul corps qui peut générer de l'électricité statique lorsqu'on le frotte. William Gilbert découvre, à la fin du 16^e siècle, que beaucoup de corps très différents peuvent être électrisés par le frottement et manifester ce mystérieux pouvoir d'attraction, mais à un degré moindre.

En 1660, Von Guericke invente la machine électrostatique qui va lui permettre de générer beaucoup plus d'électricité statique que ses prédécesseurs. Il peut ainsi observer que le globe électrisé de sa machine attire d'abord des objets légers comme du duvet, puis les repousse après qu'ils ont touché le globe !

En 1733, Dufay découvre qu'il y a en fait deux électricités différentes et que deux électricités semblables se repoussent alors que deux électricités différentes s'attirent. Quant à l'origine de l'électricité, les expériences de Benjamin Franklin, en 1747, et plus tard celles de Aepinius, en 1759, démontrent que l'électricité n'est pas créée par le frottement, mais qu'elle est présente dans toute matière. C'est sa répartition qu'on déséquilibre par le frottement. Franklin démontre également que la foudre est un phénomène électrique et il invente le paratonnerre, qui a permis d'éviter tant de catastrophes depuis. À la fin du 18^e siècle, Coulomb enrichit nos connaissances de l'électrostatique par ses mesures sur les forces d'attraction et de répulsion.

Les machines électrostatiques ont beaucoup évolué depuis Von Guericke. On est passé des machines à frottement du 17^e et du 18^e siècles aux machines dites à influence du 19^e siècle, comme la machine de Wimshurst, puis aux machines Van de Graaff au 20^e siècle. Aujourd'hui, la nouvelle génération de machines ou accélérateurs électrostatiques Pelletron est au cœur d'instruments d'analyse très sensibles, capables de mesurer des concentrations infimes d'atomes, afin, entre autres, de dater les trouvailles archéologiques, de mesurer d'infimes concentrations de polluants dans notre corps, ou encore d'analyser le contenu des bulles d'air emprisonnées dans les carottes de glace de l'Antarctique et connaître ainsi la composition de l'atmosphère dans le passé de notre planète.

D'autres applications de l'électricité statique ont vu le jour au 20^e siècle. Mentionnons la récupération des cendres et des résidus des cheminées d'usine, la photocopie et les imprimantes laser, et les projecteurs numériques à micromiroirs de nos cinémas maison. Par ailleurs, la propulsion électrocinétique pourrait bien nous réserver des surprises au 21^e siècle.

Sans plus tarder, plongeons au cœur de cette aventure de découvertes.

En l'an 1600

Un peu d'histoire

Après la découverte des propriétés de l'ambre par **Thalès**, dans l'Antiquité, il faudra attendre jusqu'en 1600 pour que **William Gilbert**, le **Galilée** de l'électricité et du magnétisme, fasse un pas de plus grâce à ses expériences minutieuses sur l'électricité.

Le premier détecteur électrique

Tout d'abord, afin de mieux étudier les forces électriques, notre médecin anglais fait une brillante invention qui lui permettra d'effectuer plusieurs découvertes. Il avait remarqué que l'aiguille d'une boussole devenait très sensible lorsqu'on la plaçait en équilibre sur une pointe. Il met donc en équilibre une fine tige de métal afin de vérifier avec quelle sensibilité cette dernière serait déviée par la force d'attraction électrique de l'ambre frotté. Son intuition était juste ; il venait d'inventer le premier appareil pour détecter et évaluer les forces électriques. Cet appareil, que l'on appelle, de nos jours, un **électroscope**, il le baptise **versorium**. La **figure 1** nous montre une représentation de ce « tourniquet électrique ».

Beaucoup de corps s'électrisent

Dans l'Antiquité, on avait découvert que le jais (une pierre noire) se comportait comme l'ambre. Jusqu'à ce que **Gilbert** fasse des expériences avec son **versorium**, on pensait que seules ces deux pierres pouvaient dégager des forces d'attraction électriques.

1



Illustration d'un versorium, tirée du livre de Gilbert, montrant cet instrument qu'il a inventé et utilisé pour détecter les faibles forces d'attraction électriques.

Or, la sensibilité de son électroscope permit à notre savant de découvrir que beaucoup d'autres corps possèdent cette vertu à différents degrés.

Dans son livre *De Magnete* (**figure 2**), il nous apprend que le verre, le soufre, la cire, la résine durcie, le mica et bien

d'autres corps attirent l'aiguille du versorium après qu'on les ait frottés avec une étoffe de laine. Il les appelle **corps électriques**.

Par ailleurs, certains matériaux comme les métaux et le bois dur, de même que la peau, n'exercent aucune force d'attraction sur le versorium, malgré toute la vigueur avec laquelle on peut frotter ces corps. **Gilbert** les appelle **corps anélectriques**.

Gilbert compare

Il fait remarquer également que les corps électrisés par le frottement n'attirent pas seulement des petits bouts de paille, comme les écrits antérieurs l'enseignaient, mais à peu près toute substance que l'on peut imaginer.

Ceci est très différent de la force d'attraction magnétique exercée par une pierre d'aimant. Cette dernière n'agit que sur le fer (selon les connaissances de l'époque), sans devoir être frottée, et son action est beaucoup plus « vigoureuse ». Une pierre d'aimant peut soulever des morceaux beaucoup plus lourds que ceux soulevés par de l'ambre frotté aussi vigoureusement qu'on le peut.

2



Fac-similé du frontispice de l'édition de 1628 du livre *De Magnete*, paru pour la première fois en 1600 (Musée de la civilisation, bibliothèque du Séminaire de Québec : *The Electrical World*, New York, May 30, 1891).

Au laboratoire

Il est très facile de construire son propre détecteur de force électrique, comme celui de **William Gilbert**.

Découpe une bande de carton d'un millimètre d'épaisseur environ et de 20 cm de longueur par 2 cm de largeur. Insère, en plein milieu de cette bande, une punaise à tête plate, que tu fixeras, sur la bande avec un morceau de ruban adhésif. Plie ensuite la bande de carton comme sur la **figure 3**. En guise de support, utilise un clou de 7 à 10 cm environ que tu planteras dans un petit bloc de bois. Dépose la pointe de la punaise sur la tête du clou, et voilà.

Avec ton *versorium*, tu peux maintenant refaire l'expérience de **Gilbert**, en frottant toutes sortes de matériaux et en vérifiant s'ils peuvent faire tourner la bande de carton. Tente de frotter : une règle de plastique contre une éponge à récurer (en caoutchouc mousse) bien sèche ; un verre en cristal de plomb* ou un ramequin en verre

contre un verre de polystyrène; une chandelle de cire contre tes cheveux; une cuiller en métal contre un tissu de polyester; un doigt contre un vieux bas de nylon; du ruban d'électricien en vinyle contre un morceau de bois (entoure le ruban autour d'une spatule à glacer); un rectangle de carton contre de la laine.

Essaye également de frotter d'autres combinaisons de ces matériaux. Tu constateras que certains matériaux peuvent être électrisés et d'autres non. Lesquels?

* **Note sur le verre:** Le cristal de plomb est une catégorie de verre qui s'électrise facilement. C'est un verre qui contient une quantité importante d'oxyde de plomb et que l'on utilise, entre autres, pour la fabrication de verres à boisson et de carafes de qualité. Les récipients en verre qui vont au four (pots à conserves, casseroles, ramequins) s'électrisent bien eux aussi. Par contre, le verre commun moderne

Matériel requis

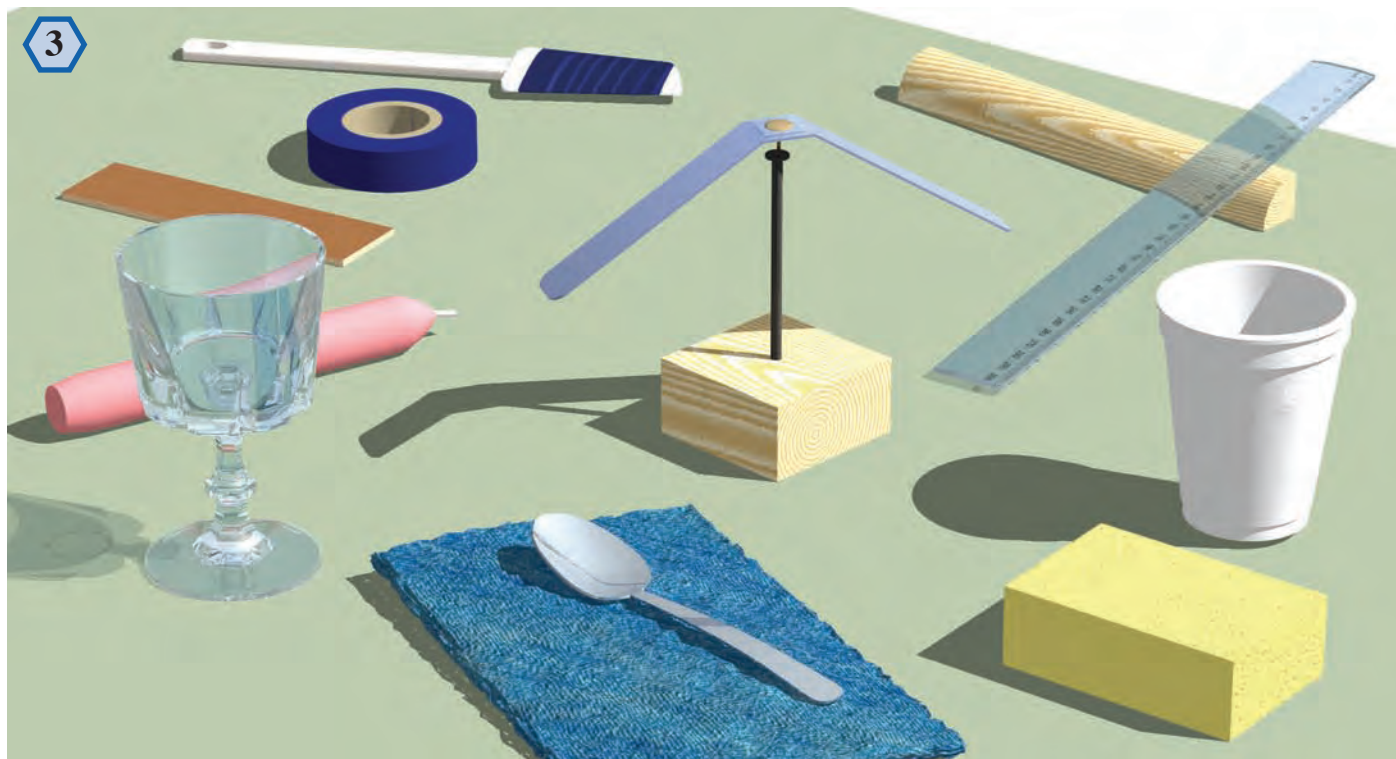
VERSORIUM

- un petit bloc de bois
- un clou de 7 à 10 cm
- une bande de carton de 2 cm × 20 cm × 1 mm
- une punaise à tête plate
- du ruban adhésif

Matériaux à frotter:

- du ruban de vinyle
- une éponge synthétique
- du tissu de laine
- du tissu de polyester
- un vieux bas de nylon
- une chandelle
- une cuiller métallique
- une règle de plastique
- un verre en cristal de plomb
- un bout de bois non verni
- un verre en polystyrène
- un rectangle de carton...

(bouteilles et verres à boisson bon marché) est difficile à électrifier.



Ce *versorium* domestique te permettra de vérifier si un corps est électrisé. Frotte les différents matériaux ensemble et fais tourner ton tourniquet électroscope en présentant les matériaux frottés à l'une des extrémités de la bande de carton.

Pour en savoir plus

- *De Magnete*, William GILBERT, édition originale, Londres, 1600. Reproduction anglaise: Dover, New York, 1958.
- *Schott Guide to Glass*, H. G. PFAENDER et H. SCHROEDER, Van Nostrand Reinhold, New York, 1983.

De 1629 à 1660

Un peu d'histoire

La science de l'électricité devait franchir un pas très important lorsque **Otto Von Guericke** (figure 1) construisit, en 1660, la première « machine électrostatique ».

Cet ingénieur allemand, qui était maire ou bourgmestre de Magdebourg, sa ville natale, pensa que pour produire de l'électricité statique en plus grande quantité, il fallait beaucoup de frottement.

Une machine électrisante

Ainsi, notre homme de science administrateur a-t-il imaginé de mettre en rotation rapide une grosse boule de soufre autour d'un axe, qui servait ensuite de manche pour manipuler la boule. Il suffisait alors de poser les mains sur la boule, pendant qu'elle tournait, pour engendrer le frottement désiré. La figure 2 nous montre une représentation de sa machine, selon une gravure ancienne.

Certains phénomènes étaient à peine observables lorsqu'on se contentait de frotter un morceau d'ambre ou de verre. Mais en utilisant la machine de **Von Guericke**, les mêmes phénomènes prenaient une tout autre ampleur et devenaient, par conséquent, plus facilement perceptibles. C'est le cas, par exemple, de la répulsion électrique.

La répulsion électrique

La première observation de ce phénomène semble avoir été faite en 1629, par le père jésuite italien **Niccolo Cabeo**.

Ce religieux a observé que lorsque des grains de limaille ou de la sciure de bois sont attirés par un corps électrisé, et qu'ils le touchent, ils sont parfois repoussés avec vigueur.

Toutefois, notre savant jésuite conclut que cette répulsion représentait, en fait, un rebondissement, comme on en observe souvent après une collision.



Otto Von Guericke (1602-1686)

Mais, grâce à la machine électrostatique de notre bourgmestre allemand, il devient évident que ce rebondissement est plutôt une force de répulsion qui agit à distance. Voici ce que nous raconte **Von Guericke** :

*Ce globe [de soufre] n'attire pas seulement, mais repousse ensuite les petits corps, en raison de leurs diverses natures, et ne les attire plus avant qu'ils n'aient touché un autre corps.**

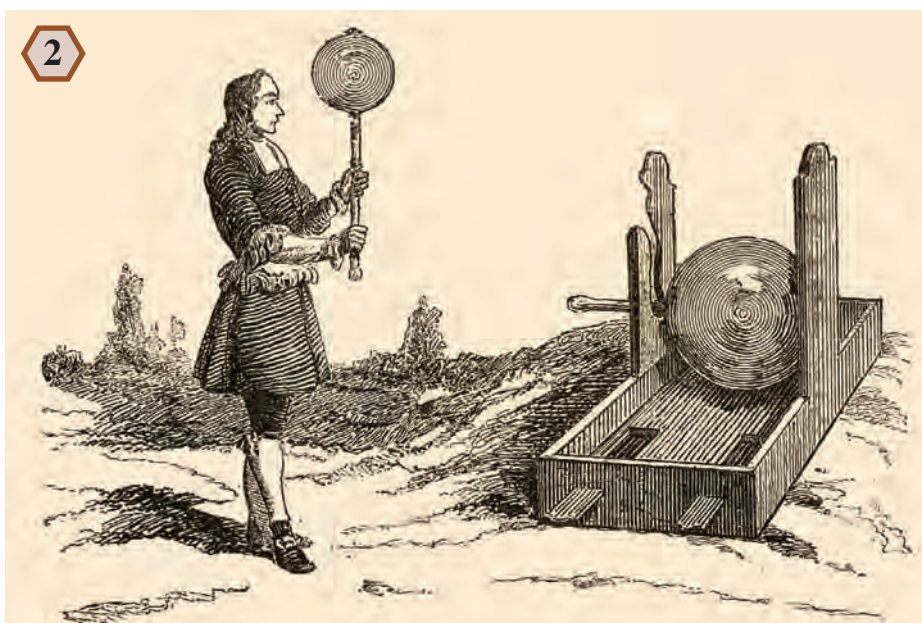
En fait, notre ingénieur faisait même « flotter » une plume au-dessus du globe de soufre électrisé, après que celle-ci ait touché le globe. Ceci démontre bien qu'il s'agit d'une véritable force de répulsion et non seulement d'un rebondissement.

L'ambre attire dans le vide

Von Guericke est bien connu également pour son invention, en 1650, de la pompe pneumatique qui permet de faire le vide d'air dans une enceinte étanche.

C'est lui qui a conçu la fameuse expérience des deux hémisphères métalliques creux, juxtaposés, dont on vide l'air. Deux attelages de huit chevaux, tirant, en directions opposées, sur les deux hémisphères, n'arrivent pas à les séparer, à cause de la pression atmosphérique. C'est **Von Guericke**, également, qui découvre que sans air, le son ne peut se propager, et une flamme s'éteint.

En utilisant cette pompe, **Robert Boyle** vérifia, en 1675, que de l'ambre frotté attire un corps léger, même lorsqu'on le place dans une enceinte dont on a enlevé l'air.



Machine électrostatique à boule de soufre, inventée en 1660 par Otto Von Guericke.

Au laboratoire

Pour observer le phénomène de la répulsion électrique, nous n'aurons pas besoin d'une machine électrostatique, car aujourd'hui nous disposons de matériaux qui s'électrisent facilement et fortement. Le polystyrène frotté à l'aide d'un morceau de vinyle s'avère particulièrement efficace pour cette expérience.

Procure-toi donc un plateau de polystyrène que l'on utilise pour l'emballage des morceaux de viande et découpe-y un rectangle qui couvrira le fond d'un récipient de plastique renversé, tel qu'illustré sur la **figure 4**. Fixe le polystyrène au récipient avec du ruban adhésif. Le récipient devrait avoir environ huit centimètres de hauteur. Pour électriser ton rectangle de polystyrène, utilise du ruban d'électricien en vinyle. Entoure une spatule à glacer ou une éponge synthétique, bien sèche, avec ton ruban; tu disposeras ainsi d'une plus grande surface de vinyle pour frotter le polystyrène.

Après avoir frotté vigoureusement, laisse tomber, sur le polystyrène électrisé, des petits morceaux de pétales de fleurs fraîches ou séchées, de trois à quatre millimètres de longueur. Les fleurs séchées, sans vernis, fonctionnent à merveille. Des petits morceaux de persil séché font très bien l'affaire également.

Dès qu'ils touchent le polystyrène, les petits morceaux sont littéralement propulsés en l'air, sous l'effet de la répulsion. Après un certain temps, il faudra électriser le carré de polystyrène de nouveau, car il se décharge graduellement, d'autant plus vite que l'air est humide. Lors des journées humides d'été, il faudra te dépêcher à laisser tomber les petits morceaux après avoir électrisé le polystyrène.

À défaut de fleurs ou de persil, utilise des petits bouts de trois à quatre millimètres d'un fil de coton que tu pourras tirer d'un vieux linge à vaisselle.



Les pétales de fleurs constituent le matériau idéal pour expérimenter la répulsion électrique.

Matériel requis

- un contenant de plastique de 8 cm de haut environ avec un fond plat de 10 cm × 10 cm approximativement
- un plateau de polystyrène, utilisé pour l'emballage de morceaux de viande, et du ruban adhésif
- une spatule à glacer ou une éponge synthétique
- du ruban d'électricien en vinyle
- des pétales de fleur ou du persil séché ou encore des bouts de fil de coton de quelques millimètres

4

Un carré de polystyrène frotté avec du vinyle attire d'abord les petits morceaux de fleurs séchées que tu laisses tomber dessus puis les repousse brusquement.



* Cet extrait du livre *Experimenta Nova* de **Von Guericke**, publié en 1672, et d'autres extraits sont inclus dans les trois livres suivants:

- *L'électromagnétisme hier et aujourd'hui*, Edmond BAUER, Albin Michel, Paris, 1949.
- *A Source Book in Physics*, compilé par William Francis MAGIE, McGraw-Hill, New York, 1935.
- *Soul of Amber*, Alfred STILL, Murray Hill, New York, 1944.

Un peu d'histoire

Lors de ton exploration de l'**épisode 2-1**, tu as sans doute essayé, sans succès, d'électriser une cuiller en métal.

Au 17^e siècle, on classait les matériaux en deux catégories : ceux qu'il était possible d'électriser (comme l'ambre, le verre, la cire, etc.) et ceux qui ne pouvaient l'être (métaux, bois, chanvre, coton, etc.).

L'électricité s'échappe du métal

Si une cuiller de métal ne peut être électrisée par frottement, en la tenant dans la main, c'est dû au fait que la cuiller, aussi bien que la main d'ailleurs, sont conducteurs d'électricité et la laissent s'échapper au fur et à mesure qu'on frotte la cuiller.

Mais croirais-tu que cent ans après les travaux remarquables de **William Gilbert**, on ignorait encore qu'il existait des corps qui conduisaient l'électricité, et d'autres qui la stoppaient ?

Cette découverte fondamentale, c'est un chercheur anglais du nom de **Étienne Gray** qui l'a faite, en 1727, de la façon suivante.

La force d'attraction se propage

Un jour, alors que Gray expérimentait avec un tube de verre au plomb qu'il

avait préalablement frotté, il observa que le bouchon de liège, qui fermait le tube à une extrémité, attirait un fragment de duvet. Pourtant, le bouchon n'avait pas été frotté !

Mais alors, se dit-il, le fluide électrique peut donc passer d'un corps qui a été frotté à un autre qui ne l'a pas été ? Il inséra ensuite une baguette de bois dans le bouchon et frotta de nouveau le tube de verre pour constater que la baguette, elle aussi, pouvait attirer des corps légers (**figure 1**).

Il essaya, de même, un long roseau qu'il laissait pendre le long de la maison, sans la toucher, en se tenant sur le toit avec le tube de verre à la main. Son assistant put vérifier que l'extrémité libre du roseau continuait à attirer des fétus de paille. La même chose se produisait lorsque le roseau était remplacé par une corde de chanvre ou des fils métalliques.

L'électricité pouvait donc se propager sur de grandes distances.

La soie est un isolant

En faisant d'autres expériences, avec son ami **Wheler**, en 1729, notre savant anglais découvre qu'une corde de soie ne transmet pas le fluide électrique.

Il y avait donc des **matériaux conducteurs d'électricité** et des **matériaux isolants**.



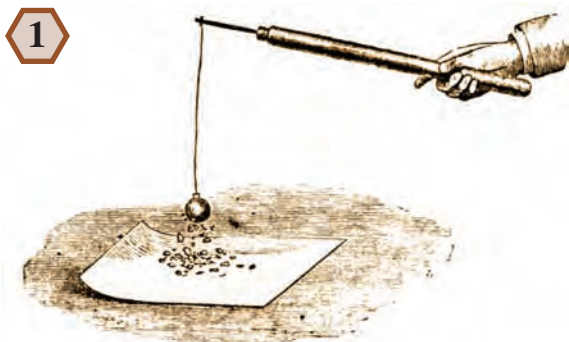
Expérience de l'abbé Nollet, vers 1740, sur la conductivité du corps humain (Musée de la civilisation, bibliothèque du Séminaire de Québec. Nollet, abbé Jean-Antoine, « Essai sur l'électricité des corps », Paris, 1753).

Le corps humain est conducteur

Gray vérifia également que le corps humain est conducteur d'électricité.

On le démontrait, de façon spectaculaire, en suspendant quelqu'un au moyen de cordes de soie (isolant), et en mettant une partie de son corps en contact avec un objet fortement électrisé, comme un tube de verre frotté vigoureusement (**figure 2**). La personne suspendue pouvait alors attirer des petits bouts de papier avec sa figure ou ses mains, ce qui prouvait bien que le corps humain est conducteur d'électricité.

L'abbé **Nollet** en fit des démonstrations très appréciées (**figure 2**).



Expérience de Gray. Le tube de verre frotté transmet son pouvoir d'attraction au bouchon de liège, à la baguette de bois, à la corde de chanvre et à la boule d'ivoire (Musée de la civilisation, bibliothèque du Séminaire de Québec. Thompson, Silvanus, « Leçons élémentaires d'électricité et de magnétisme ». Paris, 1898).

Au laboratoire

Rien ne vaut une bonne expérience pour bien comprendre et ressentir ce qui se passe. Mettons-nous donc au « travail ».

Fixe une cuiller de métal à une règle de plastique de 30 cm, à l'aide de ruban de vinyle, tel qu'illustré sur la **figure 3**. Entoure la règle, avec le ruban, sur environ 12 à 14 cm de longueur. Tu auras également besoin du *versorium* construit à l'**épisode 2-1**.

Vérifie d'abord que ni le vinyle ni la cuiller ne font réagir le *versorium*. Comme première expérience, frotte le vinyle, avec une éponge synthétique, près de l'endroit où est fixée la cuiller, sans frotter la cuiller elle-même. En approchant la cuiller du *versorium*, tu verras qu'elle le fait réagir fortement, sans pourtant avoir été frottée. La cuiller permet donc à l'électricité de se propager à travers elle. Si tu la touches avec tes doigts pendant deux à trois secondes, tu verras qu'elle n'attire plus ton « tourniquet électrique ». C'est que le corps humain, lui aussi, permet à l'électricité d'y circuler et, en fait, de s'échapper de la cuiller.

Cela signifie également qu'il est possible de charger d'électricité une cuiller métallique, en la frottant,

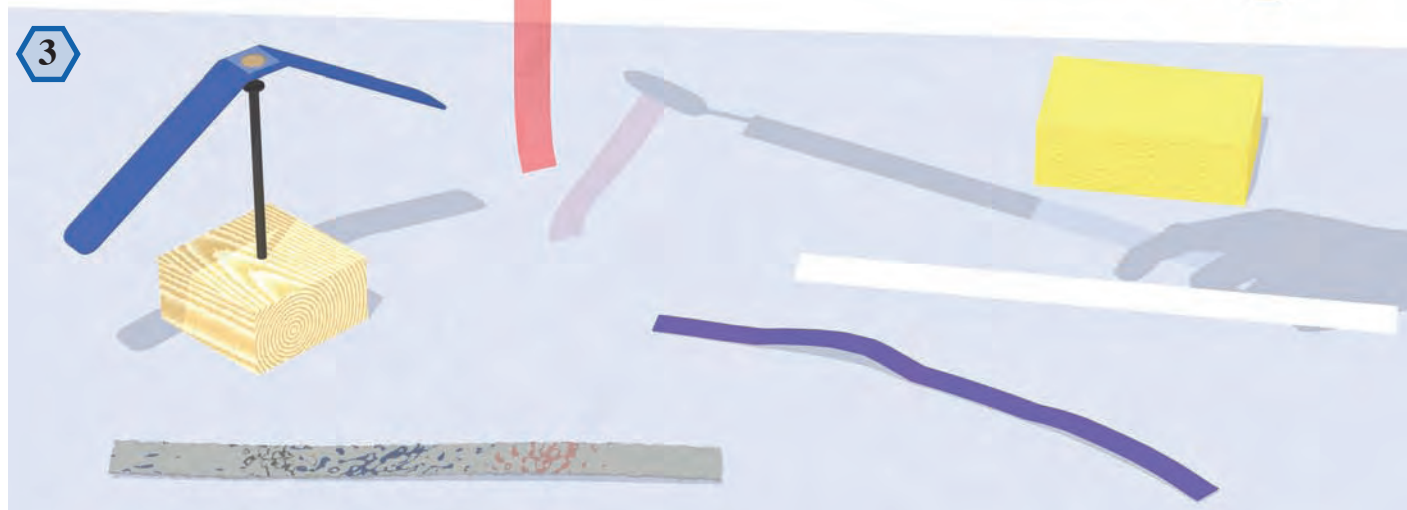
à la condition de ne pas y toucher. Tu as dû réaliser, à l'**épisode 2-1**, qu'il semblait impossible d'électrifier la cuiller métallique. Tiens donc la cuiller, fixée à la règle, entre tes doigts pendant quelques secondes, pour la décharger. Frotte-la ensuite sur l'éponge synthétique, sans frotter la règle, en tenant l'autre extrémité de la règle et en ne touchant pas à la cuiller. Tu constateras, en l'approchant du *versorium*, qu'elle s'électrise bien. Cela est possible du fait que la règle de plastique, contrairement à la cuiller de métal, ne permet pas à l'électricité d'y circuler et de s'échapper par la main, au fur et à mesure qu'on la génère par le frottement.

Complète tes expériences sur la conductivité électrique en suspendant, à la cuiller, des bandes de différents tissus et matériaux, que tu fixeras avec un petit morceau de ruban adhésif. Frotte le vinyle sur la règle, avec l'éponge

Matériel requis

- le *versorium* construit à l'**épisode 2-1**
- une règle de plastique
- du ruban d'électricien en vinyle
- une éponge synthétique
- des bandes de divers tissus et matériaux :
 - papier d'aluminium
 - papier
 - sac en plastique
 - polyester, nylon, coton
 - une chaîne d'élastiques
 - autres matériaux de ton choix

synthétique, et vérifie quelles bandes vont transmettre l'électricité jusqu'à leur extrémité inférieure et faire réagir ton *versorium*.



Version moderne de l'expérience de Gray sur la conductivité électrique de divers matériaux. Vérifie si la force d'attraction électrique se transmet jusqu'à l'extrémité inférieure des bandes, en les approchant de ton *versorium*.

Pour en savoir plus

- *Histoire de l'électricité*, Joseph PRIESTLEY, tome 1, chez Herissant le fils, Paris, 1771.
- *L'électromagnétisme hier et aujourd'hui*, Edmond BAUER, Albin Michel, Paris, 1949.
- *A Source Book in Physics*, compilé par William Francis MAGIE, McGraw-Hill, New York, 1935.
- *Soul of Amber*, Alfred STILL, Murray Hill, New York, 1944.

En l'an 1733

Un peu d'histoire

Après les expériences de **Von Guericke** sur la répulsion électrique, en 1660 (**épisode 2-2**), les physiciens étaient confus. Il devenait difficile de prévoir, dans certaines expériences sur l'électricité, si un corps allait être attiré ou repoussé.

Les choses allaient s'éclaircir, en 1733, lorsque **Charles-François de Cisternay Dufay** (**figure 1**), un jeune physicien français, démontra l'existence de deux sortes d'électricités.

Une parcelle d'or en lévitation

Dufay expérimentait la répulsion électrique avec un tube de verre au plomb et une parcelle d'une mince feuille d'or (comme celles qu'on utilise pour enluminer certains objets précieux). Il frottait son tube et laissait tomber la parcelle d'or dessus. Après avoir touché le tube, la parcelle était repoussée par celui-ci et maintenue en l'air (**figure 2**).

Notre jeune physicien comprend que la parcelle d'or, étant un bon conducteur d'électricité, prend une

2



Expérience de Dufay

partie de l'électricité du tube électrisé, en le touchant. Il en conclut donc, au début de ses expériences, que si le tube repousse la parcelle d'or, c'est que deux corps électrisés doivent se repousser mutuellement.

Mais voilà que notre physicien pense à approcher d'autres corps électrisés de la parcelle d'or, pendant qu'elle est électrisée et maintenue en l'air, à l'aide du tube de verre. Cette expérience le « déconcerta prodigieusement », comme il le dit lui-même, car en approchant de la parcelle d'or un morceau d'ambre frotté, il constate que l'ambre attire la parcelle d'or au lieu de la repousser. La même chose se produit avec un morceau de cire frotté. Par contre, s'il approche de la parcelle d'or un autre tube de verre frotté ou un morceau de cristal de roche frotté, ces corps électrisés repoussent la parcelle !

Dufay conclut de ses expériences qu'il doit y avoir deux sortes d'électricités.

Il donne les noms d'**électricité vitrée** à l'électricité du verre frotté, et d'**électricité résineuse** à l'électricité de l'ambre frotté. Plus tard, on donnera les noms d'**électricité positive** à l'électricité vitrée et d'**électricité négative** à l'électricité résineuse.

Les résultats de **Dufay** s'énoncent comme suit :

deux électricités semblables se repoussent et deux électricités différentes s'attirent.

Le pendule électrique

Puisqu'on sait désormais, grâce à **Étienne Gray**, qu'il existe

des matériaux conducteurs et d'autres isolants, les physiciens ont mis au point une expérience plus facile à réaliser pour démontrer le comportement différent des deux électricités.

Il s'agit du pendule électrique illustré à la **figure 3**. Une petite balle de sureau conductrice d'électricité est suspendue par un fil de soie qui empêche l'électricité de s'échapper de la balle. La balle remplace la parcelle d'or en lévitation dans l'expérience de Dufay. Elle est d'abord attirée par un corps électrisé, puis repoussée par celui-ci après le contact.

Détecteur à fil de soie

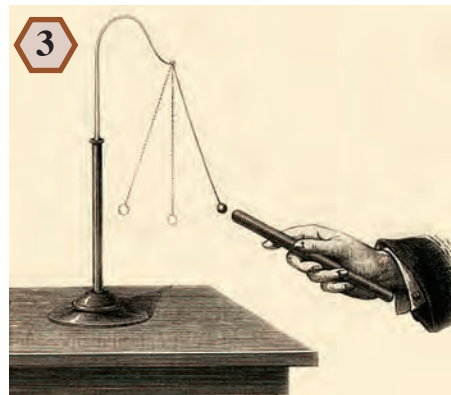
Mais **Dufay** lui-même propose une manière très simple de reconnaître la sorte d'électricité, dans un mémoire paru en 1734 dans les *Philosophical Transactions*, vol. 38, p. 258 (texte traduit par l'auteur) :

*De manière à savoir, immédiatement, à laquelle des deux classes d'électricité appartient un corps, quel qu'il soit, on a seulement besoin de rendre électrique un fil de soie, sachant qu'il a une électricité résineuse [négative], et d'observer si ce corps, rendu électrique, attire ou repousse le fil de soie.**

1



Charles-François de Cisternay Dufay (1698-1739)



Le pendule électrique à balle de sureau permet de simplifier l'expérience de Dufay.

Au laboratoire

La **figure 4** illustre le «détecteur à fils» que nous allons fabriquer, à la manière de **Dufay**, pour détecter et identifier les deux sortes d'électricités. À l'aide d'une petite scie, découpe une tige de plastique, d'environ 35 cm de long, à même un cintre de plastique. Fixe cette tige sur un contenant de crème à raser, avec du ruban adhésif, tel qu'illustré. Tu peux également utiliser une règle de plastique de 30 cm, ce qui t'évitera d'avoir à découper un cintre.

Procure-toi une retaille d'un tissu de nylon et tires-en un bout de fil de 15 cm environ. Attache-le à l'une des extrémités de la tige de plastique ou de la règle. Pour électriser ce fil de nylon, frotte-le entre deux morceaux de ruban d'électricien en vinyle. Tu n'as qu'à fixer un morceau de ruban sur ton index et un autre sur ton pouce et frotter le fil en le faisant glisser entre le pouce et l'index, tout en maintenant une pression. En faisant de la sorte, le fil de nylon sera chargé d'électricité positive. Fais-toi une étiquette avec un signe «+» et applique-la sur le contenant, du côté du fil de nylon.

Pour obtenir un «fil» chargé d'électricité négative, nous prendrons du ruban de téflon, que tu trouveras au rayon de la plomberie d'une quincaillerie. On utilise ce genre de ruban pour rendre étanches les joints vissés. Taille un bout de ruban de 15 cm et rétrécis-le, sur la largeur, à 2 ou à 3 mm, avec des ciseaux. Attache cette petite bande de téflon à l'autre bout de la tige de plastique ou de la règle. Pour l'électriser, tu n'as qu'à la frotter entre ton pouce et ton index, comme pour le fil de nylon, mais sans utiliser de ruban de vinyle. Le frottement se fera donc avec ta peau. En faisant de la sorte, la bandelette de téflon se chargera d'électricité négative. Fais-toi une étiquette avec un signe «-» et applique-la sur le contenant, du côté du «fil» de téflon.

Il suffira, par la suite, de présenter aux «fils» les différents matériaux que tu as électrisés dans l'**épisode 2-1**, pour savoir s'ils sont chargés d'électricité positive ou négative. **L'objet électrisé repoussera le fil qui a la même électricité que lui et attirera le fil qui a une électricité contraire.**

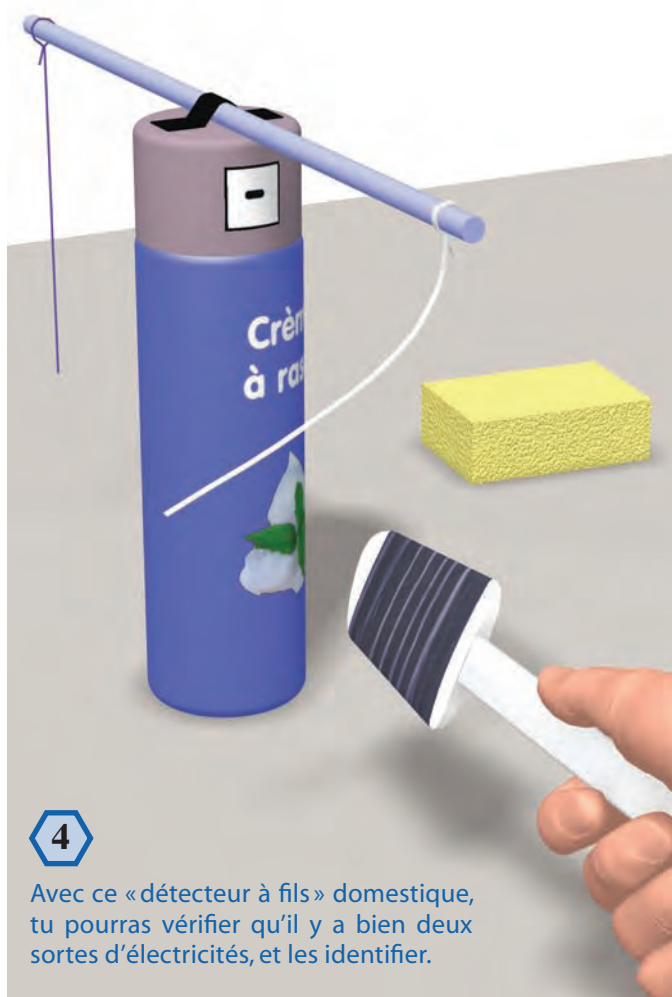
Une remarque s'impose. Les fils que tu as chargés d'électricité, en les frottant, attirent aussi des corps qui ne le sont pas, comme un peigne en plastique frotté attire des petits bouts de papier non électrisés (nous comprendrons mieux à l'**épisode 2-6**). Donc, tes fils seront attirés par un corps qui n'a pas été électrisé, mais à un degré moindre que par un corps chargé d'électricité contraire. **D'ailleurs, un objet non électrisé attirera les deux fils chargés (nylon et téflon), mais n'en repoussera aucun.**

Le nylon et le téflon s'avèrent très efficaces du fait qu'ils s'électrisent fortement et conservent bien leur électricité, même par temps humide.

Matériel requis

- un contenant de crème à raser
- un cintre en plastique et une petite scie ou une règle de plastique de 30 cm
- une retaille de tissu de nylon
- du ruban de téflon, utilisé pour les travaux de plomberie
- les matériaux utilisés dans l'épisode 2-1

Tu constateras, en expérimentant, que le même corps peut être chargé soit d'électricité positive, soit d'électricité négative. Cela dépend de l'autre matériau que tu utilises pour le frotter. En frottant le polystyrène avec du vinyle, il se charge positivement, alors qu'en le frottant avec une éponge synthétique (tampon à récurer), il se charge négativement.



Avec ce «détecteur à fils» domestique, tu pourras vérifier qu'il y a bien deux sortes d'électricités, et les identifier.

* *A Source Book in Physics*, compilé par William Francis MAGIE, McGraw-Hill, New York, 1935, p. 398.

Pour en savoir plus

- *Quatrième mémoire sur l'électricité*, Charles-François de Cisternay DUFAY, dans *Histoire de l'Académie royale des sciences (année 1733)*, pages 457 à 476, Imprimerie royale, Paris, 1735.
- *L'électromagnétisme hier et aujourd'hui*, Edmond BAUER, Albin Michel, Paris, 1949.

En l'an 1747

Un peu d'histoire

Lorsqu'on électrise un corps, en le frottant, l'électricité produite est-elle créée par le frottement? C'est l'une des questions que se posait **Benjamin Franklin** (figure 1) à l'hiver 1746-1747.

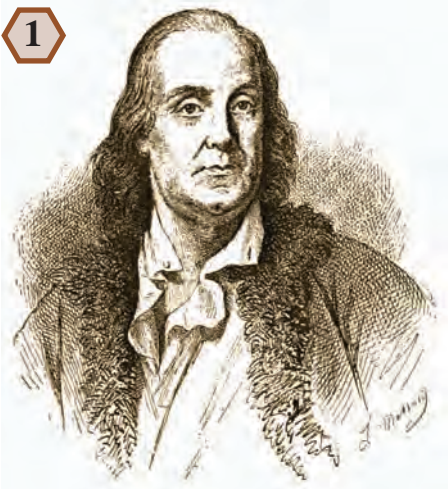
Cet Américain d'envergure, imprimeur, philosophe, politicien et homme de science, imagine plusieurs expériences afin de trouver des réponses à ses questions.

Debout sur un gâteau de cire

Dans l'une d'elles, un homme se tient debout sur un gâteau de cire (isolant électrique) et tient, dans sa main droite, un long tube de verre au plomb, par l'un de ses bouts (figure 2). Il électrise l'extrémité libre du long tube de verre en le frottant avec sa main gauche. Le verre étant un isolant électrique, l'électricité produite sur l'extrémité frottée du tube ne peut revenir dans son corps. Par ailleurs, l'homme devient lui-même électrisé, après avoir frotté le tube de verre. L'électricité reste dans son corps à cause du bloc de cire qui l'empêche de fuir.

L'extrémité frottée du tube de verre est chargée positivement, alors que le corps de l'expérimentateur est chargé négativement.

Lorsqu'il empoigne l'extrémité frottée du tube avec sa main gauche, il



Benjamin Franklin (1706-1790)



Expérience de Franklin:
un homme debout sur un gâteau de cire électrise, avec sa main gauche, l'extrémité libre d'un long tube de verre qu'il tient dans sa main droite.

n'apparaît plus de trace d'électricité ni sur son corps ni sur l'extrémité frottée du tube de verre.

L'électricité présente partout

Pour expliquer ces observations, **Franklin** conçoit le fluide électrique comme faisant partie de tous les corps. Selon lui, les corps qui possèdent leur « juste » quantité d'électricité n'apparaissent pas électrisés. Ceux qui en possèdent plus que la quantité normale apparaissent chargés positivement, alors que ceux qui en ont moins apparaissent chargés négativement. Pour lui, lorsque quelqu'un frotte un tube de verre, le tube « pompe » le fluide électrique de son corps et accumule ainsi plus d'électricité que la normale. Le tube devient donc chargé positivement et la personne qui frotte se charge négativement.

Lorsqu'on remet en contact deux corps ayant des charges contraires, en quantités égales, le fluide électrique se rééquilibre et les corps n'apparaissent plus électrisés.

Deux formulations équivalentes

Le concept du fluide électrique unique, qu'on a en trop ou dont on manque,

tel qu'exprimé par **Franklin**, est équivalent à celui des deux fluides différents de **Dufay**. L'un comme l'autre de ces modèles prévoient deux états d'électrisation.

Toutefois, les scientifiques ont trouvé plus logique d'expliquer la neutralité électrique d'un corps par deux fluides électriques en quantités égales dans ce corps et annulant leurs effets, plutôt que d'attribuer cette neutralité à une « juste » quantité d'un fluide électrique unique.

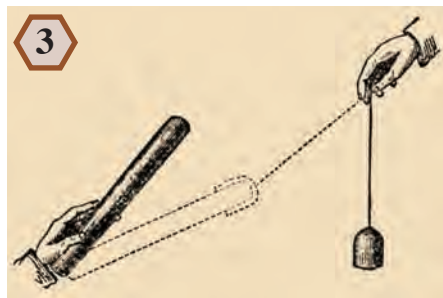
Ainsi, dans la formulation des deux électricités, qui prévaut aujourd'hui, on conclut des expériences de **Franklin** que:

1. Un corps qui ne semble pas électrisé contient les deux sortes d'électricités en quantités égales, mais ces dernières annulent leurs effets.

2. Le frottement ne crée pas d'électricité; il sépare les électricités positive et négative, toujours présentes dans toute matière.

Le capuchon de Faraday

Une centaine d'années plus tard, **Michael Faraday** popularise une expérience simple qui reproduit, de façon plus pratique, l'expérience de Franklin et démontre bien les deux principes que nous venons de voir. Il utilise un capuchon de flanelle pour frotter l'extrémité d'un barreau de résine durcie (figure 3). Cette expérience est décrite et reproduite dans la section **Au laboratoire**.



Expérience du capuchon de Faraday (Musée de la civilisation, bibliothèque du Séminaire de Québec. *Scientific American, An Illustrated Journal of Art, Science, and Mechanics*, New York, Nov. 17, 1860).

Au laboratoire

Dans son expérience (**figure 3**), **Faraday** utilise un barreau de résine qui ne laisse pas s'échapper l'électricité (isolant). Pour isoler le capuchon de flanelle, il lui attache un fil de soie. Après avoir frotté le barreau avec le capuchon qui le coiffe, en tournant le capuchon autour du barreau, **Faraday** retire le capuchon en le tenant par le fil de soie.

Il peut ainsi démontrer qu'après le frottement, le barreau est chargé négativement, alors que le capuchon est chargé d'électricité positive. Pour ce faire, il présente le barreau puis le capuchon à un objet électrisé, comme nous l'avons fait dans l'**épisode 2-4**. Lorsqu'il remet le capuchon sur le barreau, en le tenant par le fil de soie, et qu'il présente l'ensemble barreau-capuchon à son objet électrisé de référence, l'ensemble apparaît non électrisé.

Pour reproduire cette expérience, procure-toi, dans le rayon de la plomberie d'une quincaillerie, 25 centimètres de tuyau en PVC de 2 cm de diamètre environ, de même qu'un bout

de manchon souple pour l'isolation thermique des tuyaux d'eau chaude. Le diamètre intérieur du manchon devra s'adapter au diamètre extérieur du tuyau.

Entoure une dizaine de centimètres du tuyau de PVC avec du ruban d'électricien en vinyle. Le PVC est un bon isolant électrique; il empêchera l'électricité de s'échapper. Tu recouvriras le bout de manchon avec un tube fait à même un rectangle de tissu de nylon (un peu de couture sera nécessaire; demande de l'aide). Le tube de tissu devrait mesurer 32 cm de long et le bout de manchon, 11 cm. Tu pourras ainsi replier le tube de tissu à l'intérieur du manchon et ramener les deux extrémités ensemble pour former une sorte de queue de tissu. Fais coudre ces extrémités et pince la queue de tissu à l'aide d'une épingle à linge en plastique. Tu auras ainsi une poignée isolante pour tenir le manchon (l'équivalent du fil de soie de **Faraday**).

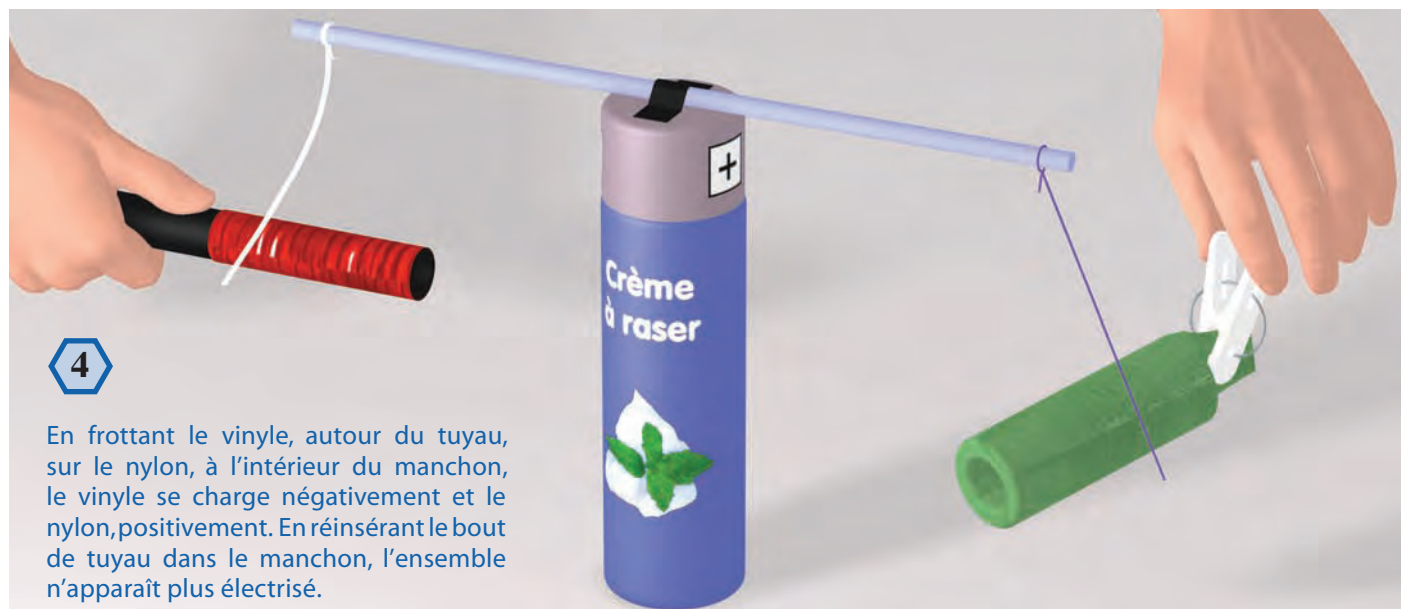
Reproduis l'expérience de **Faraday** en utilisant le détecteur à fils, construit à l'**épisode précédent**, pour identifier la sorte d'électricité présente (**figure 4**).

Matériel requis

- le **versorium** de l'épisode 2-1
- le détecteur de l'épisode 2-4
- du ruban de vinyle
- un rectangle de tissu de nylon de 15 cm × 36 cm
- 25 cm de tuyau en PVC de 2 cm de diamètre
- un bout de 11 cm d'un manchon d'isolation thermique pour les conduits d'eau chaude, avec un diamètre intérieur adapté au tuyau de PVC
- une épingle à linge en plastique

Assure-toi, au préalable, que ni le tube de PVC ni le manchon ne sont électrisés. Emploie ton *versorium* pour cette vérification. Pour enlever l'électricité du manchon, tiens-le dans ta main quelques secondes. Pour le vinyle, il faudra humecter tes doigts et les glisser le long du vinyle, sur le bout de tuyau.

Utilise ton *versorium* pour vérifier qu'après avoir tourné le manchon sur le tuyau, ces derniers n'apparaissent pas électrisés lorsqu'ils sont ensemble.



4

En frottant le vinyle, autour du tuyau, sur le nylon, à l'intérieur du manchon, le vinyle se charge négativement et le nylon, positivement. En réinsérant le bout de tuyau dans le manchon, l'ensemble n'apparaît plus électrisé.

Pour en savoir plus

- *Œuvres de M. Franklin*, Benjamin FRANKLIN, chez Quillau l'aîné et Esprit, Paris, 1773.
- *Benjamin Franklin's Science*, Bernard COHEN, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1990.
- *L'électromagnétisme hier et aujourd'hui*, Edmond BAUER, Albin Michel, Paris, 1949.
- *Electricity in the 17th and 18th Centuries*, J. L. HEILBRON, Dover, Mineola, New York, 1999.
- *Professor Faraday's Lectures on the Physical Forces: Lecture V. Magnetism-Electricity*, Michael FARADAY, The Scientific American, vol. III, n° 21, 17 novembre 1860, p. 322 à 324.
- *On the Various Forces of Nature*, Michael FARADAY, The Viking Press, New York, 1960.

De 1753 à 1759

Un peu d'histoire

Les découvertes de **Benjamin Franklin** sont très vite connues en Europe, en raison de la correspondance qu'il entretient avec quelques amis de ce continent. Ainsi, d'autres expériences ne tardent pas à confirmer ses vues et conclusions.

Premières observations

En 1753, **John Canton**, un maître d'école londonien, fait une découverte intéressante. En approchant un objet électrisé près d'un cylindre de métal suspendu par des cordes de soie (la soie est un isolant), **Canton** observe que le cylindre suspendu devient temporairement chargé d'électricité, sans qu'on y touche. Ceci, il peut le constater grâce à des paires de boules de liège qu'il suspend au cylindre à l'aide de fils de lin (conducteurs d'électricité).

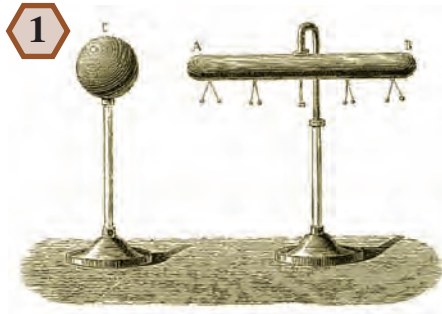
Lorsqu'il approche l'objet électrisé du cylindre, les boules de liège se repoussent et s'écartent, ce qui démontre bien que le cylindre est chargé d'électricité à l'endroit même où les boules sont suspendues (**figure 1**). En éloignant l'objet électrisé, le cylindre redevient normal et toute trace d'électricité disparaît.

Examen plus minutieux

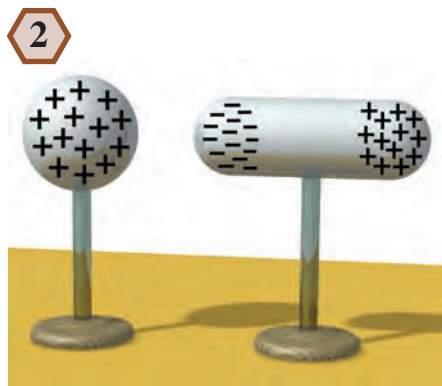
C'est un savant allemand du nom de **Aepinus** qui, en 1759, vient donner plus d'éclaircissements sur ce phénomène. Il expérimente avec une grosse boule chargée d'électricité, qu'il approche d'un des bouts d'un cylindre métallique. La boule et le cylindre sont disposés sur des pieds en verre, afin de les isoler électriquement.

Il constate alors que le bout du cylindre qui est le plus près de la boule chargée d'électricité acquiert une charge électrique contraire à celle de la boule, alors que le bout du cylindre le plus éloigné est chargé d'une électricité semblable (**figure 2**).

À la suite de ses observations, **Aepinus** donne une explication qui va dans le même sens que les idées de



Expérience de Canton: l'écartement des boules de liège indique que les concentrations les plus fortes du fluide électrique sont localisées dans les bouts du cylindre.



Aepinus démontre que, dans l'expérience de Canton, les deux extrémités du cylindre concentrent les électricités contraires.



C'est l'induction électrostatique qui fait en sorte que des bouts de papier non électrisés soient attirés par un barreau de verre frotté.

Franklin, soit que l'électricité est déjà présente dans la matière et qu'elle se manifeste lorsqu'on déséquilibre sa distribution.

Dans la formulation de la théorie des deux électricités de **Dufay**, le cylindre métallique, qui au début ne semble pas électrisé, possède, en fait, les deux sortes d'électricités en quantités égales. Mais lorsque l'électricité négative et l'électricité positive sont mélangées, elles annulent leurs effets.

Lorsqu'on approche une boule chargée d'électricité près d'un bout du cylindre, l'électricité contraire à celle de la boule est attirée par l'électricité de la boule, alors que l'électricité semblable subit une force de répulsion, selon les lois que nous avons vues (**épisode 2-4**).

Or, puisque le cylindre métallique est un conducteur et laisse circuler facilement l'électricité, les deux bouts du cylindre se retrouvent chargés d'électricités contraires, alors que normalement les deux électricités sont bien mélangées.

On dit qu'il y a eu une **électrisation par influence** et on appelle ce phénomène l'**induction électrostatique**.

Attraction de morceaux de papier

C'est d'ailleurs l'induction électrostatique qui explique l'attraction des morceaux de papier non électrisés par un barreau de verre qu'on a frotté (**figure 3**).

C'est en effet l'électricité contraire à celle du barreau qui sera attirée près de ce dernier dans un morceau de papier. L'électricité semblable sera repoussée le plus loin possible dans le morceau de papier. Mais, comme la force exercée par les charges électriques du barreau diminue avec la distance, c'est la force d'attraction qui l'emportera, puisque les charges contraires sont plus près du barreau.

Au laboratoire

Dans notre séance de laboratoire, nous allons réaliser une variante de l'expérience de **Aepinus**.

En guise de cylindre métallique, utilise deux petites boîtes de conserve de pâte de tomate. Il faut que les boîtes soient pleines. Après avoir enlevé l'étiquette de papier qui les recouvre, fixe-les, à l'horizontale, sur deux petits pots de plastique, à l'aide de ruban adhésif (**figure 4**). Les pots serviront de pieds isolants. Place les boîtes de conserve bout à bout, de manière à ce qu'elles se touchent.

Pour induire un déplacement des charges électriques à la surface des boîtes, il te faut un objet bien électrisé. À cet effet, découpe un rectangle de polystyrène de 6 cm × 20 cm, à même un plateau utilisé pour l'emballage de la viande. Nettoie-le et assèche-le bien. Pour l'électriser, dépose le rectangle à plat sur une table et frotte-le vigoureusement avec une petite éponge à récurer recouverte de ruban d'électricien en vinyle.



4

Reconstitution de l'expérience d'Aepinus sur l'électrisation induite d'un conducteur, montrant que l'électricité positive et l'électricité négative sont déjà présentes dans un objet conducteur, même si cet objet ne semble pas électrisé *a priori*.

Matériel requis

- le détecteur à fils de l'épisode 2-4
- du ruban de vinyle
- une éponge à récurer
- un plateau en polystyrène
- deux boîtes de pâte de tomate
- deux petits pots en plastique

d'électricité négative. En présentant la boîte de gauche au fil de nylon électrisé du détecteur, tu verras qu'il est repoussé, ce qui indique que *la boîte de gauche est chargée d'électricité positive.*

En remettant les deux boîtes en contact, tu constateras qu'elles ne sont plus électrisées, par la suite, puisque chacune des deux boîtes attire alors les deux fils du détecteur et n'en repousse aucun.

Les deux électricités sont donc toujours présentes dans les boîtes métalliques. Tu les as séparées par induction. En recombinaison des deux électricités, par la suite, leurs effets s'annulent de nouveau.

Pour en savoir plus

- *L'électromagnétisme hier et aujourd'hui*, Edmond BAUER, Albin Michel, Paris, 1949.
- *Electricity in the 17th and 18th Centuries*, J. L. HEILBRON, Dover, Mineola, New York, 1999.
- *An Essay on the Theory of Electricity and Magnetism*, F.U.T. AEPINUS, Princeton University Press, Princeton, 1979 (traduction récente du livre original, en latin, datant de 1759).

En l'an 1775

Un peu d'histoire

La compréhension du phénomène d'induction électrostatique, que nous venons d'explorer à l'**épisode précédent**, a permis à un grand savant italien, le comte **Alessandro Volta**, de mettre au point, en 1775, un appareil ingénieux pour générer de l'électricité statique à répétition.

L'électrophore

Cet appareil, qu'il nomme **électrophore**, se compose d'un disque épais, ou « gâteau », selon la terminologie de l'époque, fait d'une matière isolante, comme de la résine que l'on utilisait alors, et d'un disque métallique à bords arrondis, muni d'un manche isolant (**figure 1**).

Tout d'abord, on frottait le gâteau de résine avec une peau de chat (mort, bien entendu), ce qui chargeait la résine négativement. Ensuite, on déposait le disque de métal à plat sur le gâteau de résine chargé, et on touchait le disque de métal avec un doigt. Ce contact,

très important, permet au disque de se charger d'électricité positive par influence.

Détails de son fonctionnement

Pour être plus précis, disons que l'électricité négative du gâteau de résine frotté agit sur les deux électricités du disque de métal de la façon suivante : l'électricité positive du disque est attirée vers la face touchant le gâteau de résine, et l'électricité négative est repoussée vers l'autre face du disque de métal (**figure 2**).

Comme nous l'avons vu à l'**épisode 2-3**, le corps humain est un conducteur d'électricité. Aussi, lorsqu'on touche le disque de métal avec un doigt, l'électricité négative du disque, étant repoussée par l'électricité négative du gâteau de résine, quittera le disque par le doigt. Ainsi, après avoir enlevé le doigt, le disque de métal se retrouve chargé positivement.

Si on approche une jointure du bord du disque alors qu'il est chargé d'électricité positive et qu'il repose sur le gâteau de résine, rien ne se passe. Par

contre, si on soulève le disque avec le manche isolant et que l'on approche une jointure (moins sensible que le bout du doigt) du bord du disque, une étincelle jaillit entre le disque et la jointure. Après quoi, le disque n'apparaît plus chargé d'électricité.

Des éclairs miniatures

Pour comprendre ce qui se passe, disons que lorsque le disque de métal repose sur le gâteau de résine, l'électricité négative du gâteau annule les effets de l'électricité positive du disque. Mais, en soulevant le disque, les charges électriques qui s'y trouvent vont attirer fortement les charges négatives environnantes. C'est pour cela qu'en approchant une jointure du disque métallique, une étincelle jaillit et le décharge de son électricité (**épisode 2-18**). C'est, en quelque sorte, comme un éclair miniature.

De l'électricité à répétition

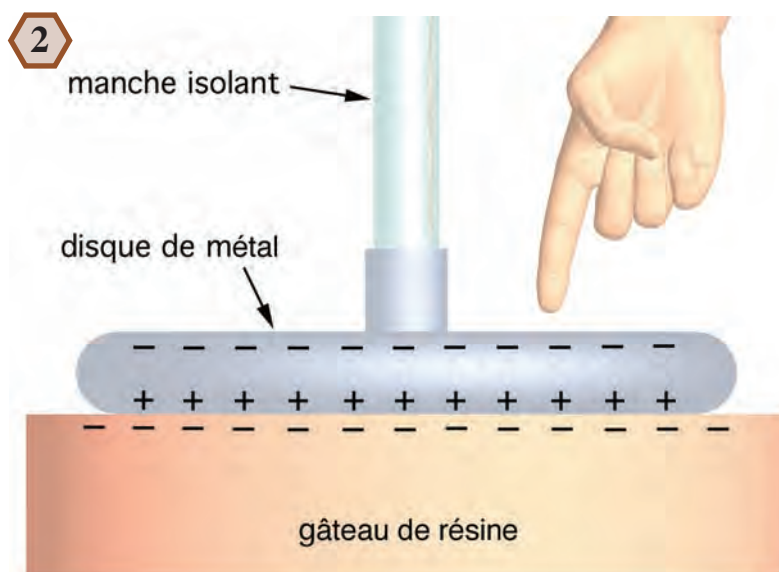
Le grand avantage de cet appareil est qu'on peut recommencer plusieurs fois, sans avoir besoin de frotter à nouveau le gâteau de résine.

1



Électrophore à gâteau de résine avec un manche isolant en verre, selon une illustration du 19^e siècle.

2



Distribution des charges électriques dans le disque de métal de l'électrophore, avant de le toucher avec le doigt. En touchant le disque, les charges négatives de ce dernier sont repoussées dans le corps humain. Après avoir enlevé le doigt, le disque de métal sera chargé positivement.

Au laboratoire

Nous allons construire un électrophore maison particulièrement efficace, comme tu pourras le constater par toi-même.

Pour ce faire, procure-toi, dans une quincaillerie, un bloc de polystyrène de 25 cm × 25 cm de côté, ayant 2,5 cm d'épaisseur ou plus. Demande une retaille d'un panneau de polystyrène que l'on utilise pour l'isolation thermique des maisons. Le polystyrène est un isolant électrique et il remplacera le gâteau de résine qu'on utilisait autrefois. Son épaisseur est importante, car si le bloc de polystyrène est trop mince, l'électricité statique induite dans la table, sous le bloc, annulera en partie l'effet de l'électricité que l'on produit par frottement sur la face supérieure du bloc. En épaississant le bloc, on éloigne sa face supérieure de celle de la table, ce qui rend l'électrophore plus efficace.

Au lieu de frotter directement le dessus du bloc de polystyrène, nous

recouvrons ce dernier d'une couche de ruban d'électricien en vinyle, car ce matériau est plus efficace. Il suffira de frotter le vinyle à plusieurs reprises avec une éponge synthétique bien sèche pour l'électrifier.

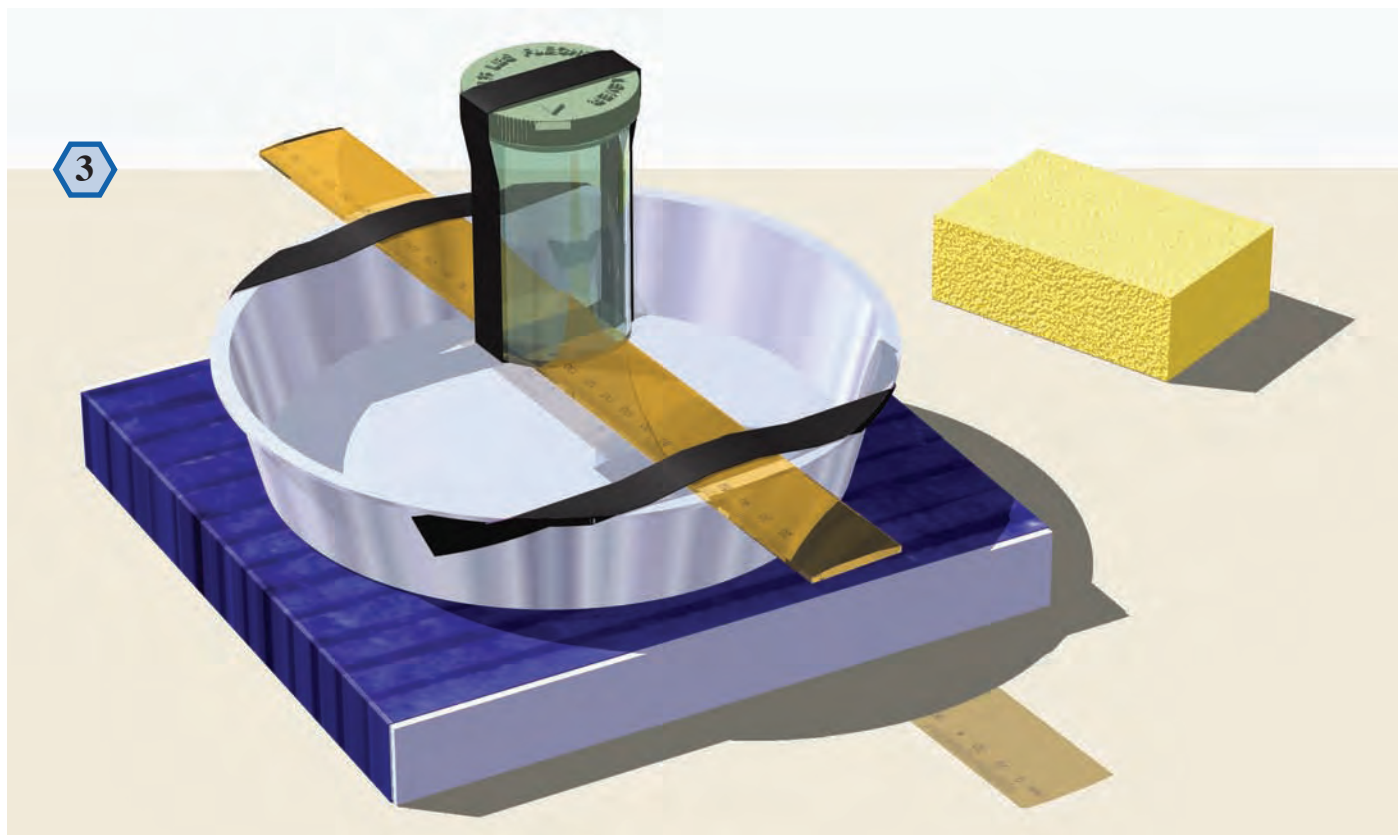
En guise de plateau métallique, nous utiliserons un moule à gâteau ou une assiette à tarte en aluminium rigide. Pour fabriquer un manche isolant, utilise une règle de plastique de 30 cm et un petit contenant cylindrique en plastique, que tu fixeras au moule à gâteau à l'aide de ruban adhésif en vinyle, tel qu'illustré sur la **figure 3**.

Sans plus tarder, frotte la surface de vinyle avec l'éponge synthétique pour la charger d'électricité négative. Dépose ensuite le moule à gâteau sur la surface que tu viens d'électrifier et touche le moule avec un doigt. Le moule se charge alors d'électricité positive, par influence. Tu peux le vérifier à l'aide du « détecteur à fils » que tu as construit à l'**épisode 2-4**.

Matériel requis

- un carré de polystyrène de 25 cm × 25 cm de côté avec une épaisseur de 2,5 cm ou plus
- du ruban d'électricien en vinyle
- un moule à gâteau ou une assiette à tarte en aluminium rigide
- une règle en plastique de 30 cm de longueur
- un petit contenant cylindrique en plastique
- une éponge synthétique

En soulevant le moule à l'aide du manche isolant, et en approchant une de tes jointures du rebord du moule, tu devrais, par temps sec, pouvoir faire jaillir une étincelle électrique de 2 à 3 cm de longueur, entre le moule et ta jointure. Ceci démontre bien la quantité importante d'électricité présente dans le moule.



Avec cet électrophore maison, tu pourras produire, par temps sec, des étincelles électriques de deux à trois centimètres !

Pour en savoir plus

- *Le monde physique : Le magnétisme et l'électricité*, Amédée GUILLEMIN, Librairie Hachette et Cie, Paris, 1883.
- *Electricity in the 17th and 18th Centuries*, J. L. HEILBRON, Dover, Mineola, New York, 1999.

De 1745 à 1759

Un peu d'histoire

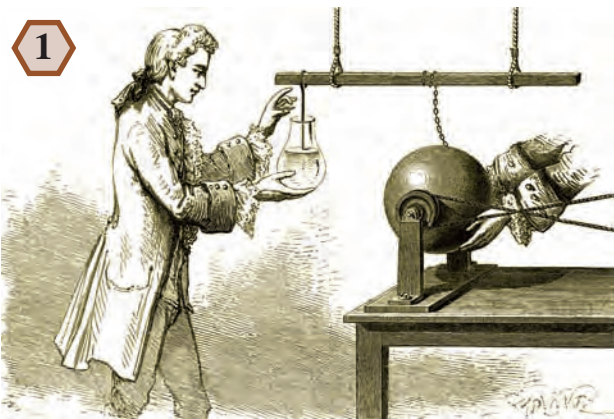
Avant 1745, les expériences sur les phénomènes électriques manquaient d'énergie, faute de pouvoir accumuler suffisamment d'électricité dans un corps.

En effet, puisque les charges électriques semblables se repoussent, lorsqu'on veut les accumuler sur un objet, il devient de plus en plus difficile d'en ajouter.

Un heureux hasard

C'est un « heureux » hasard expérimental qui allait tout bouleverser. Cette découverte fortuite fut faite indépendamment par un chanoine de Poméranie, **Ewald Von Kleist** (octobre 1745), et un magistrat de la ville de Leyde aux Pays-Bas, **Andreas Cunéus** (janvier 1746).

Voulant électriser un vase rempli d'eau, qu'il tenait dans une main, **Cunéus** eut la surprise de sa vie



Expérience de la bouteille de Leyde faite par Cunéus.

lorsqu'il voulut toucher à la tige de métal reliant l'eau à une machine électrostatique (figure 1).

Il ressentit une violente secousse qui lui indiquait une grande quantité d'électricité dans la bouteille; jamais personne n'avait réussi à en accumuler une telle quantité dans un corps de la même grosseur.

La bouteille de Leyde

L'expérience fut vite connue sous l'appellation de *bouteille de Leyde*, car **Muschenbroek**, le professeur responsable du laboratoire où eut lieu la découverte, à Leyde, s'empressa de communiquer les résultats à l'Académie des sciences de Paris.

On ne tarda pas à améliorer les performances de la bouteille, en recouvrant sa paroi extérieure d'une feuille d'étain (qu'on appela *armature*) et en remplaçant l'eau par une autre feuille d'étain épousant la paroi intérieure de la bouteille. Le contact électrique avec cette dernière paroi était assuré par une petite chaîne métallique attachée à un crochet en métal qui traversait le bouchon de la bouteille (figure 3).

De manière à emmagasiner encore plus d'électricité, on reliait plusieurs bouteilles de Leyde dans une caisse. Les quantités d'électricité ainsi obtenues devenaient dangereuses à manipuler lorsqu'on employait une machine électrostatique puissante pour les charger. On se mit donc à utiliser un arc métallique, tenu par des manches isolants, auquel on donna le nom d'*excitateur* (figure 2). Pour décharger les bouteilles, il suffisait d'établir le contact entre la paroi extérieure et le crochet.

Franklin observe

À l'hiver 1746-1747, **Franklin** observe tout d'abord qu'en essayant de charger une bouteille de Leyde, alors qu'elle est déposée sur un isolant électrique, on n'obtient qu'une petite fraction de la charge. La pleine charge est obtenue seulement lorsqu'on tient la bouteille dans la main.

Dans une autre expérience, il place une bouteille de Leyde électrisée positivement sur de la cire (isolant) et il utilise un fil de soie (isolant) auquel est suspendue une petite boule de liège



Bouteille de Leyde que l'on décharge avec un excitateur.

(conducteur). En approchant cette boule de la tige qui sort de l'intérieur de la bouteille, la boule est d'abord attirée, puis repoussée après avoir touché la tige. Alors qu'elle est dans cet état de répulsion, il baisse la main de manière à ce que la boule soit vis-à-vis du bas de la bouteille. La boule est alors attirée.

Franklin en conclut que l'armature extérieure de la bouteille est chargée négativement (figure 3).

Après le contact avec l'armature extérieure, la boule de liège n'est presque pas repoussée. Cela est dû au fait que les armatures intérieure et extérieure exercent des forces contraires sur la boule de liège.

C'est le fait de tenir la bouteille dans la main qui permet de charger son extérieur par influence, comme pour le plateau de l'électrophore qu'il faut toucher pour le charger d'électricité (épisode 2-7).

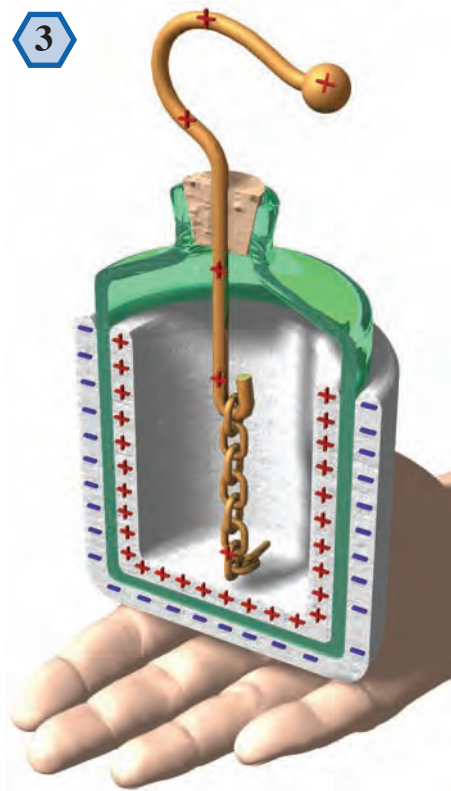
Un condensateur électrique

Si la bouteille de Leyde peut emmagasiner beaucoup d'électricité, c'est dû à la faible répulsion rencontrée par les charges électriques que l'on veut déposer à l'intérieur de la bouteille. Ce sont les charges de l'armature extérieure qui annulent en bonne partie la force de répulsion exercée par les charges de l'armature intérieure sur l'électricité de même signe qu'on veut y déposer. C'est le principe de ce qu'on appelle de nos jours un **condensateur électrique**.

Au laboratoire

Procure-toi un petit contenant en plastique cylindrique de 10 à 12 cm de hauteur, muni d'un couvercle en plastique. Demande à un adulte expérimenté de faire un trou dans le couvercle, avec une perceuse, de manière à pouvoir y faire passer le boulon de carrosserie à tête arrondie.

Taille une bande de papier d'aluminium suffisamment longue pour faire le tour de ton contenant cylindrique et suffisamment large pour faire environ trois fois la hauteur du contenant. Plie la bande plusieurs fois, afin de réduire sa largeur à environ 80 % de la hauteur de la paroi extérieure du contenant.



Section d'une bouteille de Leyde schématisée, dont les armatures d'étain ont été exagérément épaissies aux fins de l'illustration. En déposant des charges positives à l'intérieur de la bouteille, ces dernières attirent, par influence, les charges négatives de la personne qui tient la bouteille.

Entoure ton contenant avec cette bande et fixe-la avec du ruban adhésif. Remplis ton contenant d'eau au trois quarts et fixe le boulon au couvercle avec deux écrous (**figure 4**).

En guise d'excitateur, fixe une petite équerre métallique à un tube en plastique à l'aide de ruban adhésif, comme sur la **figure 4**. La coque d'un vieux stylo en plastique fera un tube de plastique idéal.

Pour charger ta bouteille, utilise l'électrophore de l'**épisode précédent**. Approche le plateau chargé de la tête du boulon. Tu devrais voir et entendre l'étincelle qui jaillit entre les deux. Tu peux répéter la manœuvre une vingtaine de fois.

Souviens-toi que, pour charger la bouteille efficacement, tu dois toucher la feuille métallique extérieure avec ta main. Mais ATTENTION, n'approche pas ton autre main du boulon, car tu recevras une décharge beaucoup plus forte que celle de l'électrophore. Ce n'est pas dangereux avec le matériel de cet épisode, mais la décharge électrique risque d'être désagréable.

Prends maintenant ton excitateur en le tenant par le manche de plastique. Maintiens le bout inférieur de l'équerre métallique en contact avec la paroi extérieure de ta bouteille et approche lentement le bout supérieur de l'équerre de la tête du boulon. Tu pourras ainsi observer une étincelle beaucoup plus intense que celle de l'électrophore.

Tu constateras qu'en déposant ta bouteille de Leyde sur un petit bol en plastique renversé (isolant) pour la charger, sans y toucher, elle ne se charge presque pas.

Enfin, pour refaire l'expérience de la boule de liège de Franklin, utilise un petit rectangle de 1 cm × 2 cm en papier d'aluminium (mieux que le liège) fixé à un bout de fil à coudre en polyester (isolant) à l'aide de ruban adhésif. Arrondis les coins du rectangle. Vérifie ensuite comment l'extérieur de la bouteille se charge d'électricité

Matériel requis

- l'électrophore (épisode 2-7)
- un petit contenant cylindrique en plastique, de 10 à 12 cm de hauteur
- un boulon de carrosserie de 15 cm et deux écrous
- un petit bol en plastique
- un stylo en plastique
- une petite équerre en fer
- du ruban de vinyle
- du papier d'aluminium
- du fil à coudre en polyester

contraire à celle de l'intérieur, en utilisant la procédure décrite à la page précédente.



Bouteille de Leyde maison et son excitateur à équerre métallique.

Pour en savoir plus

- *Œuvres de M. Franklin*, Benjamin FRANKLIN, chez Quillau l'aîné et Esprit, Paris, 1773.
- *Les Merveilles de la Science*, Louis FIGUIER, chez Furne Jouvett et Cie, volume 1, 1868.
- *Benjamin Franklin's Science*, Bernard COHEN, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1990.
- *Electricity in the 17th and 18th Centuries*, J. L. HEILBRON, Dover, Mineola, New York, 1999.

De 1747 à 1752

Un peu d'histoire

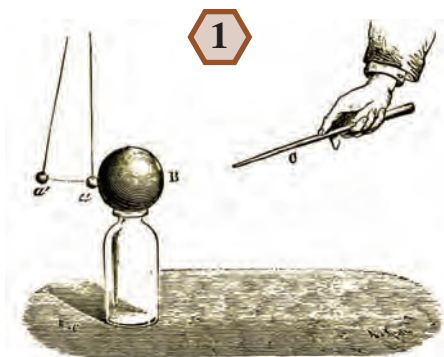
Nous avons vu que l'électricité statique, lorsqu'elle est accumulée en quantité suffisante sur un corps, pouvait produire des étincelles qui ressemblent en fait à des éclairs miniatures. Il est donc normal qu'on ait fait le rapprochement avec les éclairs naturels qui parsèment souvent les ciels orageux. Mais il fallait le prouver.

C'est **Benjamin Franklin**, à l'automne 1749, qui imagine le moyen de vérifier cette théorie.

L'effet des pointes

C'est une découverte que **Franklin** a faite en 1747 qui va lui donner l'idée. Cette découverte est celle du mystérieux pouvoir qu'ont les tiges métalliques pointues d'arracher, pour ainsi dire, l'électricité d'un objet électrisé sans qu'on ait besoin d'y toucher. Voici comment il décrit l'expérience qu'il a réalisée :

Placez un boulet de fer de trois ou quatre pouces de diamètre sur l'orifice d'une bouteille de verre bien nette et bien sèche; par un fil de soie attaché au plafond précisément au-dessus de l'orifice de la bouteille, suspendez une petite boule de liège environ de la grosseur d'une balle de mousquet; que le fil soit de longueur convenable pour que la boule de liège vienne s'arrêter à côté du boulet; électrisez le boulet, et le liège sera repoussé à la distance de quatre



Expérience de Franklin sur le pouvoir des pointes métalliques.

*ou cinq pouces, plus ou moins, suivant la quantité d'électricité [figure 1]. Dans cet état, si vous présentez au boulet la pointe d'un poinçon, long et mince, à six ou huit pouces de distance, la répulsion sera détruite sur-le-champ, et le liège volera vers le boulet... Le feu électrique est tiré par la pointe.**

Ce phénomène s'explique par la façon dont se distribuent les charges électriques à la surface des conducteurs. En effet, nous verrons à l'épisode 2-12 que l'électricité a tendance à s'accumuler sur les parties pointues (figure 5). Cela produit des forces électriques considérables près d'une pointe, ce qui charge d'électricité les molécules d'air voisines de celle-ci. Les molécules sont alors repoussées fortement par la pointe et vont décharger l'objet électrisé. C'est d'ailleurs cet objet qui électrise la pointe par influence (épisode 2-6).

Une tige de fer pointue

À la suite de cette découverte, **Franklin** se dit, en 1749, que si les nuages orageux sont électriques, on devrait pouvoir tirer leur électricité à l'aide d'une pointe métallique.

Il suffit d'ériger verticalement une tige de fer pointue et d'isoler cette tige pour que l'électricité qu'elle capte ne s'écoule pas dans la terre. Pour vérifier la présence d'électricité sur la tige, notre chercheur de Philadelphie suggère de lui présenter un barreau métallique relié à la terre, afin d'en tirer une étincelle.

Cette expérience extrêmement dangereuse fut réalisée pour la première fois par le physicien français **Dalibard**, en mai 1752 (figure 2). Un autre physicien moins chanceux est mort foudroyé en la tentant, en 1753. **Franklin** ne l'avait pas tentée lui-même, croyant qu'il fallait ériger la tige au sommet d'une haute tour, qui ne lui était pas accessible.



Expérience de la tige de fer pointue, réalisée par Dalibard à Marly, en France, le 10 mai 1752. L'isolation de la tige est assurée par quatre bouteilles de verre et des cordes de soie.



Expérience du cerf-volant de Franklin, réalisée à Philadelphie, en juin 1752.

Un cerf-volant

Alors qu'il ignorait la réussite de **Dalibard**, **Franklin** a une autre idée : utiliser un cerf-volant.

Il fixe donc à son cerf-volant une pointe métallique reliée à la corde de chanvre qu'il utilise pour le faire voler. L'électricité des nuages peut ainsi être conduite jusqu'à lui. De plus, la corde mouillée par la pluie conduit très bien l'électricité. Il peut ainsi charger une bouteille de Leyde et démontrer qu'elle est bel et bien remplie d'électricité, au mois de juin 1752 (**figure 3**).

Cette expérience est également très dangereuse. Notre illustre savant aurait pu être foudroyé et perdre la vie. **Ne l'essaie jamais.**

Le paratonnerre

Franklin imagine même la première application concrète des connaissances sur l'électricité, le paratonnerre.

Puisque les pointes déchargent les objets à distance, il se dit qu'en

installant des tiges de fer pointues, reliées au sol par un fil conducteur, sur le dessus des édifices, il pourrait décharger les nuages de leur électricité avant que l'accumulation d'électricité soit suffisamment grande pour que la décharge (l'éclair) se produise.

Si la foudre vient quand même à tomber sur l'édifice, elle est attirée par le paratonnerre qui conduit la décharge dans la terre sans danger.

Au laboratoire

Pour vérifier par toi-même l'effet des pointes métalliques, utilise une petite boîte de conserve en métal que tu déposeras sur un bol en plastique renversé, afin de l'isoler électriquement (**figure 4**).

Le détecteur à fils, que tu as construit à l'**épisode 2-4**, est encore plus sensible que la boule de liège de **Franklin** pour visualiser l'état d'électrisation d'un objet. Électrise négativement la bandelette de téflon de ton détecteur, en la faisant glisser entre ton pouce et ton index, et place-la à une quinzaine de centimètres de la boîte de conserve.

Après avoir chargé la boîte d'électricité positive avec ton électrophore, en mettant en contact le plateau électrisé avec la boîte de conserve, la bandelette de téflon sera attirée par celle-ci et s'alignera dans la direction de la boîte.

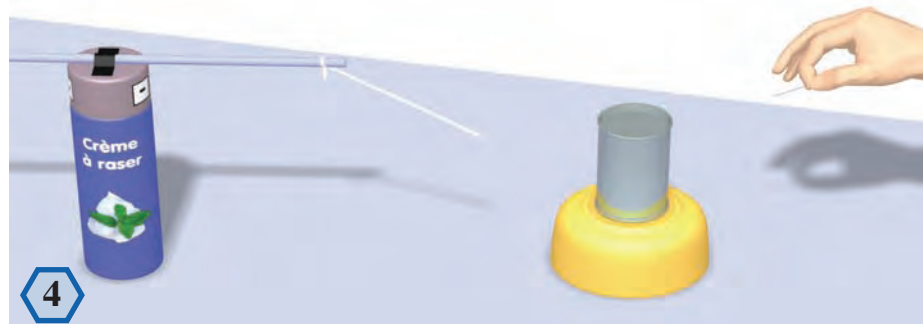
En approchant la pointe d'une aiguille à coudre de la boîte de conserve électrisée, sans toucher la boîte, tu verras la bandelette de téflon retomber. Ceci indique bien que la boîte se décharge de son électricité.

Tu comprends, à la lumière de cette expérience, qu'il faut éviter toute aspérité sur un objet qu'on veut électriser, sans quoi l'effet des pointes le fera se décharger rapidement.

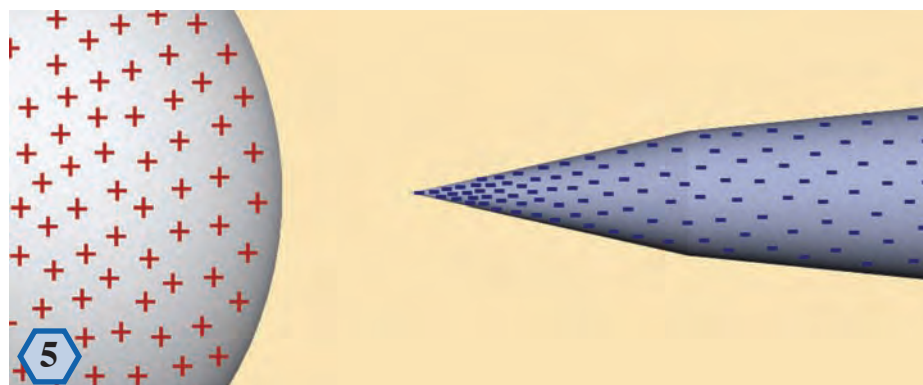
Avec ton détecteur à fils disposé de la sorte, tu peux également vérifier le temps que prend la boîte à se décharger d'elle-même, sans l'aiguille. Elle se déchargera d'autant plus rapidement que l'air est humide.

Matériel requis

- l'électrophore de l'épisode 2-7
- un bol en plastique
- une petite boîte de conserve en métal
- le détecteur à fils de l'épisode 2-4
- une aiguille à coudre



Variante de l'expérience de Franklin sur le pouvoir des pointes métalliques.



Un objet chargé d'électricité positive (à gauche) induit des charges négatives sur une pointe métallique dans son voisinage. La densité des charges électriques est d'autant plus grande qu'on s'approche du sommet de la pointe.

* *Œuvres de M. Franklin*, Benjamin FRANKLIN, deuxième lettre à Collinson (11 juillet 1747), chez Quillau l'aîné et Esprit, Paris, 1773, p. 3.

Pour en savoir plus

- *La foudre, nature, histoire, risques et protection*, Claude GARY, Dunod, Paris, 2004.
- *Benjamin Franklin's Science*, Bernard COHEN, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1990.
- *Les Merveilles de la Science*, Louis FIGUIER, chez Furne Jouvett et Cie, volume 1, 1868.

De 1755 à 1837

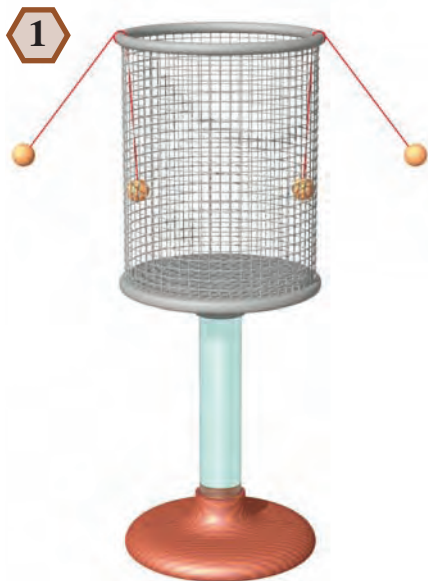
Un peu d'histoire

On est redevable à **Benjamin Franklin** pour une autre découverte importante dans le domaine de l'électricité. Il s'agit de l'absence de forces électriques à l'intérieur d'un contenant métallique.

Expérience de Franklin

Voici ce qu'il écrit au docteur **Lining**, de la Caroline du Sud, en 1755 :

*J'ai électrisé un récipient cylindrique d'une pinte, en argent, sur un support isolant, et j'y ai fait descendre une balle de liège d'environ un pouce de diamètre, suspendue à un fil de soie, jusqu'à ce que le liège touche le fond du récipient. Le liège n'était pas attiré par l'intérieur du récipient, comme il l'aurait été par l'extérieur et quoiqu'il ait touché le fond, après l'avoir retiré, il n'était pas électrisé par ce contact comme il l'aurait été en touchant l'extérieur du récipient. Le phénomène est singulier. Vous demandez une explication : je ne la connais pas.**



Cage cylindrique en treillis métallique, sur un pied isolant. Lorsqu'on électrise la cage, les boules de liège à l'extérieur sont repoussées, alors que celles qui sont à l'intérieur ne sont pas affectées.

Les figures 1 et 2 nous font voir des instruments de démonstration du 19^e siècle, utilisés pour reproduire l'expérience de **Franklin**.

La cage de Faraday

En 1837, le grand savant anglais **Michael Faraday** reprend l'expérience de **Franklin**, de façon plus spectaculaire, en faisant construire une grande cage métallique et en s'installant lui-même à l'intérieur pour expérimenter.

Cette cage était suspendue par de grosses cordes de soie, afin de l'isoler électriquement. Après qu'un assistant eut électrisé la cage avec une puissante machine électrostatique, **Faraday**, à l'intérieur de la cage, ne put détecter aucune force électrique avec ses instruments.**

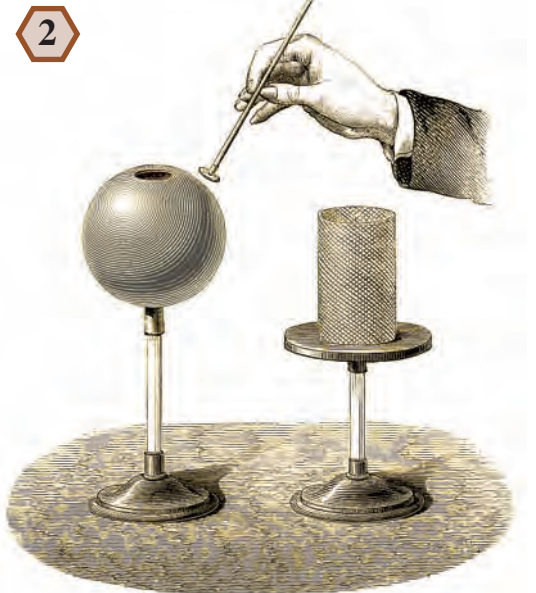
C'est de là que provient l'expression « **cage de Faraday** » qu'on emploie encore de nos jours pour décrire une enceinte métallique fermée ayant pour but de protéger certains instruments sensibles.

Dans la vie de tous les jours

Nous faisons souvent l'expérience de la cage de **Faraday** dans notre vie de tous les jours, entre autres lorsque nous écoutons la radio alors que nous circulons en automobile.

En effet, tu as sûrement déjà remarqué qu'en pénétrant dans un tunnel ou un garage souterrain, la réception de la radio devenait très mauvaise, voire nulle. Ce qu'il faut savoir, c'est que les ondes radio sont, en fait, des ondes électriques, et que les structures en béton armé contiennent des grillages en fer pour les rendre plus solides. C'est le grillage de fer qui agit comme une cage de **Faraday** et bloque les ondes radio.

Mentionnons, par ailleurs, que si l'automobile est un endroit très



À l'aide d'un petit disque métallique fixé à un manche isolant, on prélève de l'électricité à différents endroits sur des contenants métalliques creux électrisés et isolés par des tiges de verre. On présente ensuite le petit disque à un électroscope comme le détecteur à fils (épisode 2-4) pour vérifier s'il est électrisé. On démontre ainsi que les charges électriques se retrouvent seulement à l'extérieur.

sécuritaire lors des orages, c'est à cause de sa coque métallique qui fonctionne comme une cage de **Faraday**.

Pourquoi ?

Si les forces électriques sont nulles à l'intérieur d'une cage de **Faraday**, c'est d'abord parce que les charges électriques, dans le métal de la cage, se déplacent constamment sous l'influence des charges électriques extérieures (par induction électrostatique, **épisode 2-6**). Ces migrations de charges électriques, sur la cage, annulent, à l'intérieur de celle-ci, les effets des charges extérieures.

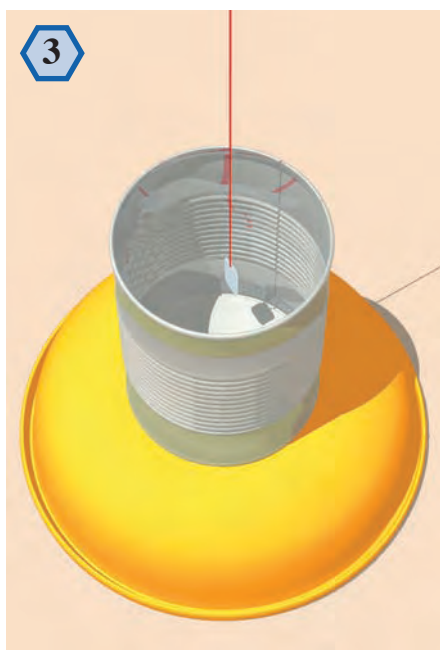
La deuxième condition essentielle (pour annuler les forces électriques dans la cage), c'est que les forces électriques diminuent selon le carré de la distance. Mais cette démonstration dépasse le niveau de ce livre.

Au laboratoire

L'expérience de **Franklin** est facilement reproduite à l'aide d'une boîte de conserve métallique vide, déposée sur un bol en plastique renversé pour l'isoler.

Électrise la boîte avec ton électrophore (**épisode 2-7**) et utilise ton petit rectangle d'aluminium aux coins arrondis, fixé à un bout de fil à coudre en polyester (**épisode 2-8**).

Assure-toi que le petit rectangle d'aluminium n'est pas électrisé en le tenant dans ta main quelques secondes. Laisse-le ensuite pendre au bout du fil, et approche-le de l'extérieur de la boîte électrisée. Il sera d'abord attiré puis fortement repoussé. Décharge-le en le tenant de nouveau dans ta main et descends-le à l'intérieur de la boîte, en prenant soin à ce qu'il ne touche pas au rebord de celle-ci. Tu verras qu'il n'est ni attiré ni repoussé par les parois de la boîte de conserve (**figure 3**), ce qui démontre que les forces électriques ne pénètrent pas à l'intérieur d'un contenant métallique. Touche à la paroi



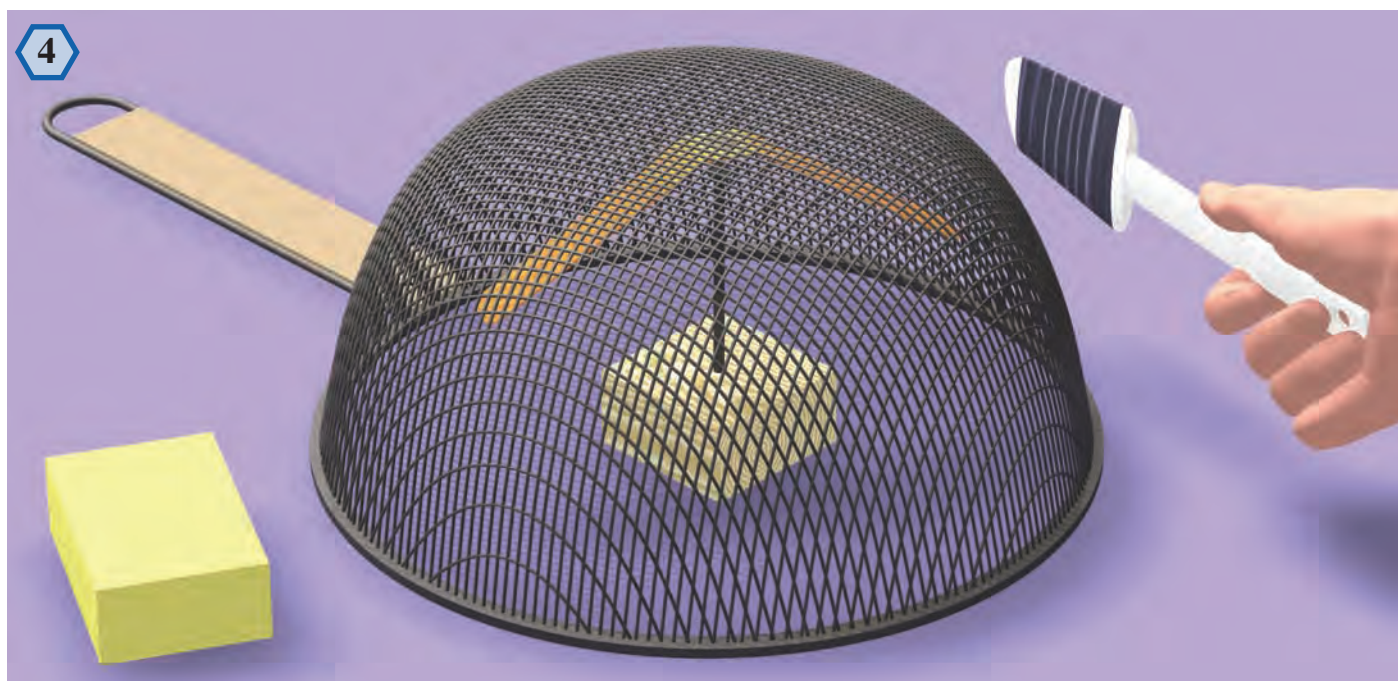
Le petit rectangle d'aluminium non électrisé, qu'on descend à l'intérieur d'une boîte de conserve vide et électrisée, n'est pas attiré ni repoussé par les parois de la boîte, ce qui démontre que les forces électriques sont nulles à l'intérieur de celle-ci.

Matériel requis

- l'électrophore (**épisode 2-7**)
- un bol en plastique
- une boîte de conserve vide
- du papier d'aluminium
- du fil à coudre en polyester
- le versorium (**épisode 2-1**)
- une grande passoire métallique
- une spatule à glacer en plastique
- du ruban de vinyle
- ton détecteur à fils (**épisode 2-4**)

intérieure avec le rectangle et sors-le de la boîte pour vérifier avec ton détecteur à fils (**épisode 2-4**) qu'il n'est pas électrisé. Fais de même pour la paroi extérieure de la boîte.

Reproduis également l'expérience de la **figure 4**. En recouvrant ton versorium (**épisode 2-1**) d'une passoire métallique, tu ne pourras pas le faire bouger avec un objet électrisé. Les forces électriques ne pénètrent pas à l'intérieur de la passoire.



En recouvrant ton versorium avec une passoire métallique, il ne sera pas possible de le faire bouger en approchant un objet électrisé, ce qui démontre bien que les forces électriques ne pénètrent pas à l'intérieur d'une cage métallique.

* *Lettre de Franklin au docteur Lining (18 mars 1755)*: Œuvres de M. Franklin, Benjamin FRANKLIN, chez Quillau l'ainé et Esprit, Paris, 1773, p. 181 ; *The Ingenious Dr. Franklin, Selected Scientific Letters of Benjamin Franklin*, GOODMAN, Nathan G., University of Pennsylvania Press, Philadelphia, 1931, p. 111.

** *Experimental Researches in Electricity*, Michael FARADAY, 3 volumes, édition originale à Londres, 1839-1855. Nouvelle édition : Green Lion Press, Santa Fe, New Mexico, 2000, volume 1, p. 365, paragraphe 1173.

De 1772 à 1785

Un peu d'histoire

Nous venons de voir à l'épisode précédent que le fait d'avoir des forces électriques nulles à l'intérieur d'un contenant métallique est relié à la façon dont les forces électriques varient avec la distance.

En effet, **Newton** avait démontré qu'une variation en $1/r^2$ de la force gravitationnelle (où r représente la distance entre les masses) implique son annulation à l'intérieur d'une coquille sphérique de matière.

L'expérience de Cavendish

Pour ce qui est des forces électriques, **Henry Cavendish**, un grand physicien anglais, indépendant de fortune, réalise une expérience très précise avec une coquille métallique sphérique électrisée (1772-1773). Les résultats de cette expérience n'ayant pas été publiés ni divulgués, ce n'est qu'un siècle plus tard que **Maxwell** retrouvera les notes de **Cavendish** et les fera publier (1879).

Ses expériences prouvent que les forces électriques sont nulles à l'intérieur d'une coquille sphérique métallique électrisée. Par ailleurs, il démontre mathématiquement qu'en supposant une variation en $1/r^n$ de la force électrique, ce n'est que la solution avec $n=2$ qui annule les forces partout à l'intérieur de la coquille. Il en conclut donc que les forces électriques varient comme $1/r^2$.

Les expériences de Coulomb

Mais c'est **Charles-Augustin Coulomb** qui effectue les mesures directes de la force électrique en fonction de la distance, en 1785.

Pour mesurer les forces de répulsion entre deux électricités semblables, il utilise une balance à torsion similaire à celle qu'il avait utilisée pour mesurer les forces magnétiques. Réfère-toi à l'épisode 1-11 pour comprendre le fonctionnement de cet instrument.

Sa balance à torsion électrique (**figure 1**) est plus sensible. Il utilise, pour cette dernière, un fil d'argent très fin de 30 pouces (76 cm) de long. La structure de la balance est en verre (isolant) et l'électricité est déposée sur une balle de sureau (conducteur) de 5 à 6 mm de diamètre, fixée à l'extrémité d'une petite tige horizontale isolante, elle-même suspendue au fil d'argent.

Un petit disque de papier est fixé à l'autre extrémité de la tige, pour agir comme contrepoids et pour amortir les oscillations. La force de répulsion électrique que l'on mesure s'exerce entre la balle de sureau suspendue et une autre balle de sureau fixe, positionnée à la bonne hauteur grâce à une petite tige isolante verticale.

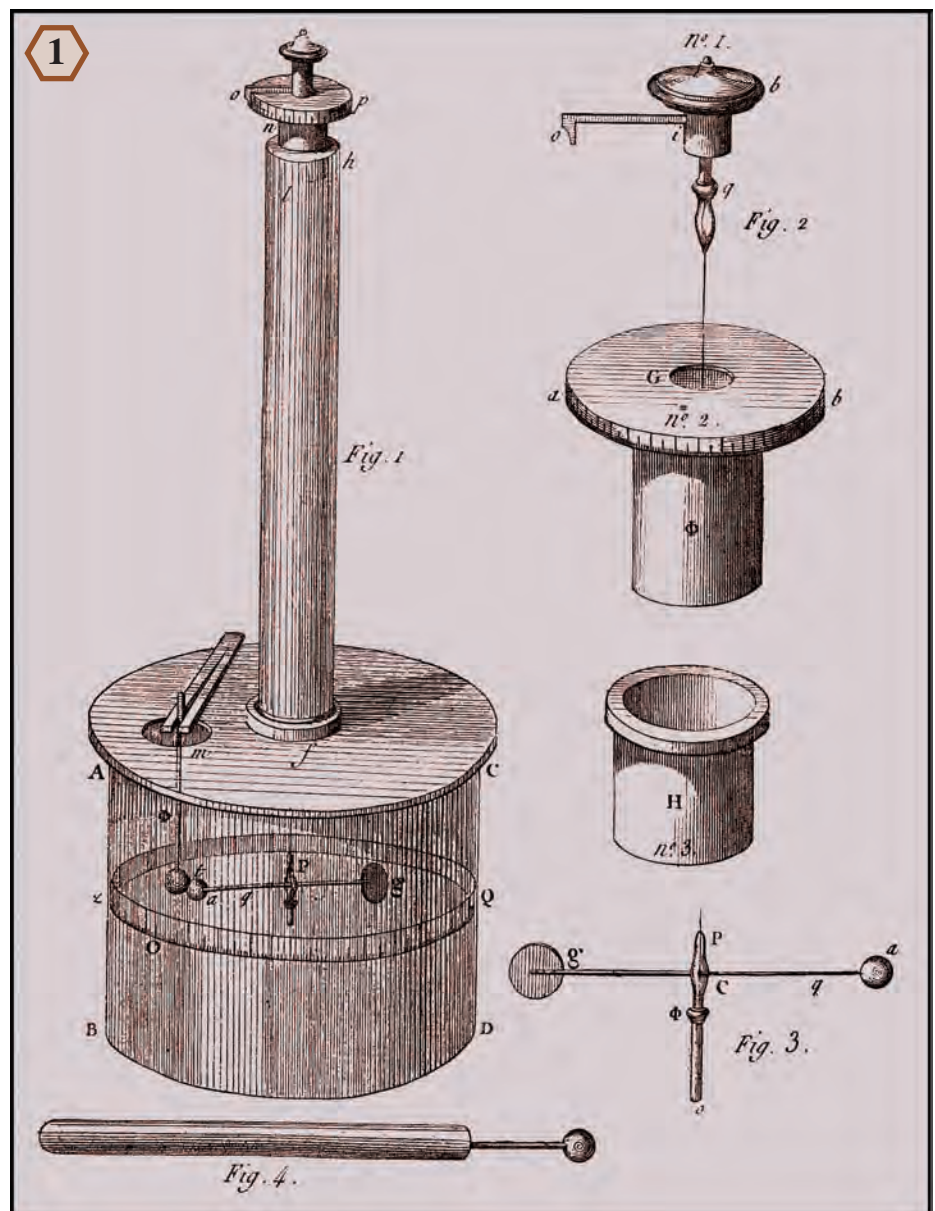


Illustration de la balance à torsion, utilisée par Coulomb pour mesurer les forces électriques de répulsion entre les charges semblables, tirée de son mémoire de 1785.

Le déplacement de la balle suspendue est mesuré grâce à une échelle graduée qui entoure le contenant cylindrique en verre. La torsion du fil peut être variée et mesurée à l'aide d'un mécanisme gradué situé sur la partie supérieure de la balance.

Pour effectuer une série de mesures, **Coulomb** décharge d'abord les deux balles de sureau de la balance. Il électrise ensuite une petite balle de sureau fixée sur un manche isolant (**figure 1** en bas à gauche) et il la met en contact avec la balle de sureau fixe, à l'intérieur de la balance. L'électricité se répand alors sur cette balle fixe et sur la balle de sureau suspendue, qui la touche. La balle suspendue est immédiatement repoussée et **Coulomb** mesure la torsion du fil pour différentes distances entre les balles.

L'expérience est délicate (c'est la raison pour laquelle nous n'avons pas tenté de la reproduire) et l'électricité des balles se dissipe lentement dans l'air environnant. **Coulomb** doit en tenir compte pour obtenir des résultats précis.

Les résultats de ses mesures lui confirment que la force de répulsion électrique varie bien comme l'inverse du carré de la distance.

Pour mesurer les forces d'attraction entre deux électricités contraires, notre ingénieur français éprouve des difficultés, car les deux balles de sureau ont tendance à se précipiter l'une sur l'autre et à se décharger. Il utilisera plutôt la méthode des oscillations qu'il avait également mise à profit dans la mesure des forces magnétiques (voir l'**épisode 1-10**).

Coulomb dispose un globe métallique de 30 cm de diamètre sur un pied isolant, dans le plan d'oscillation d'une petite tige de gomme-laque (isolant). Cette dernière est suspendue par un fil de soie (isolant) à une fixation mobile, tel qu'illustré sur la **figure 2**. Un petit disque de papier doré de 15 mm de diamètre est fixé à une extrémité de

la tige horizontale et un contrepoids à l'autre extrémité.

Pour effectuer les mesures, il électrise le globe avec une sorte d'électricité et il touche du doigt le petit disque doré, qui se charge alors d'électricité contraire, par induction.

En raison des travaux de **Newton**, **Coulomb** sait que si la force d'attraction varie comme l'inverse du carré de la distance, alors les charges électriques sur le globe se comportent comme si elles étaient concentrées en son centre. De plus, il démontre, grâce aux lois de la mécanique de **Newton**, que, pour une telle force, la période d'oscillation de la tige doit être proportionnelle à la distance entre le centre du globe et celui du disque.

C'est ce que ses expériences confirment. Et c'est ainsi qu'il nous lègue la loi régissant la force **F** entre deux

charges électriques Q_1 et Q_2 séparées par une distance r :

$$F = \frac{k Q_1 Q_2}{r^2}$$

où **k** est une constante de proportionnalité, et les charges électriques sont supposées ponctuelles.

Cette loi nous dit également que si l'une des charges **Q** double, la force **F** sera deux fois plus grande. C'est ce que **Coulomb** suppose dans son mémoire de 1785, sans le démontrer toutefois. Pour lui, il s'agissait d'une évidence. Il le démontrera une année plus tard, comme nous le verrons au **prochain épisode**.

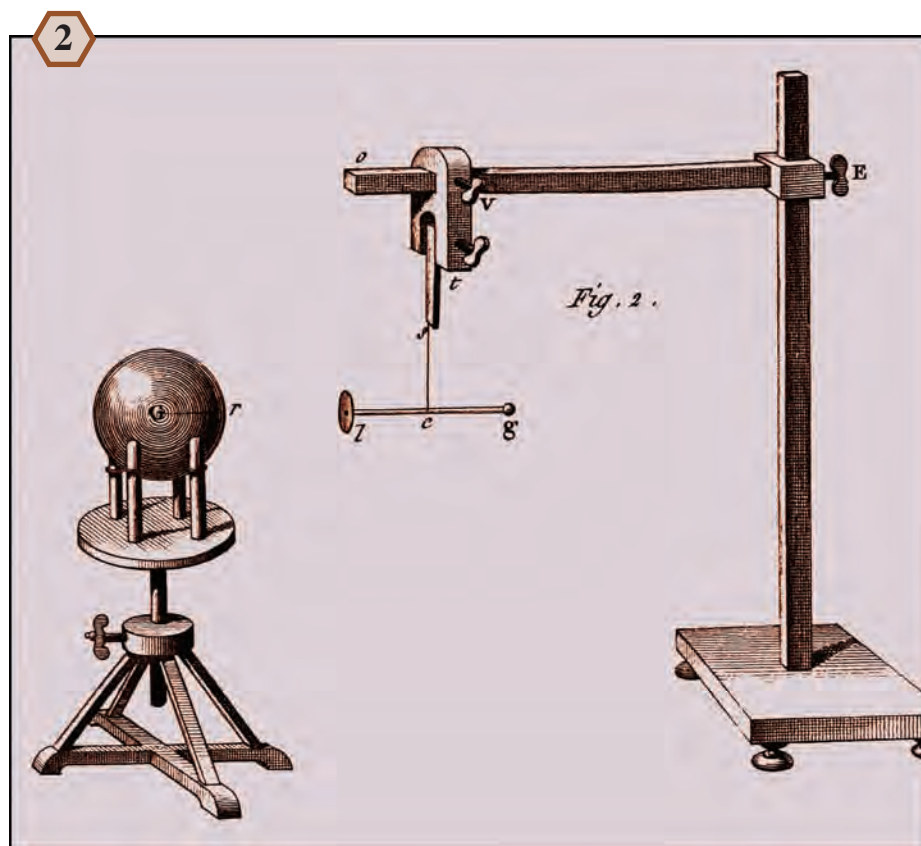


Illustration de l'appareil à oscillations, utilisé par **Coulomb** pour mesurer les forces électriques d'attraction entre les charges contraires, tirée de son mémoire de 1785.

Pour en savoir plus

- *Mémoires relatifs à la physique*, C. A. COULOMB, Librairie scientifique et technique Albert Blanchard, Paris, 2002.
- *Electricity in the 17th and 18th Centuries*, J. L. HEILBRON, Dover, Mineola, New York, 1999. Les travaux de COULOMB et de CAVENDISH sont détaillés aux pages 468 à 489.

De 1786 à 1788

Un peu d'histoire

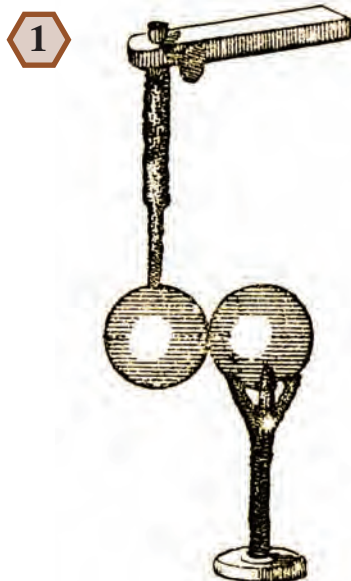
De 1786 à 1788, **Coulomb** pousse plus à fond ses études des phénomènes électriques. Il s'intéresse à la façon dont se distribue l'électricité à la surface des conducteurs.

Deux sphères de même diamètre

Pour commencer, il utilise une petite sphère métallique fixée à une tige isolante (sphère de gauche sur la **figure 1**), qu'il charge d'électricité à l'aide d'un électrophore (**épisode 2-7**). Il insère cette sphère électrisée dans sa balance à torsion (**épisode précédent**), et mesure la force de répulsion entre la sphère et la petite balle de sureau mobile de sa balance.

Ensuite, il reprend la sphère électrisée et la met en contact avec une sphère identique non électrisée, reposant sur un pied isolant (sphère de droite sur la **figure 1**). En raison de la symétrie, chacune des sphères prend la moitié de la charge.

Il remet alors la sphère dans la balance à torsion et vérifie que la force a bien diminué de moitié.



En mettant en contact une sphère conductrice électrisée avec une sphère identique non électrisée, chacune d'elles prendra la moitié de la charge, en raison de la symétrie.



Prélèvement d'échantillons d'électricité à différents endroits sur un objet électrisé (Musée de la civilisation, bibliothèque du Séminaire de Québec. Ganot, Adolphe, «Traité élémentaire de physique expérimentale et appliquée, et de météorologie. Paris, 1860).

Coulomb répète cette expérience en mettant en contact deux sphères de même diamètre, mais faites de matériaux conducteurs différents. Il trouve toujours que chacune des deux sphères prend la moitié de la charge électrique, ce qui démontre que le matériau n'y est pour rien dans la façon dont se distribue l'électricité. Seule la répulsion mutuelle des charges semblables entre en jeu.

Coulomb mesure les distributions

Avec un petit disque conducteur, fixé sur une tige isolante, notre savant prélève des échantillons d'électricité à différents endroits sur des objets conducteurs électrisés (**figure 2**).

À chaque prélèvement, il insère le petit disque dans sa balance et mesure la quantité d'électricité prélevée. Il peut ainsi vérifier la façon dont se distribue l'électricité. Trois conclusions principales se dégagent :

- 1) dans un objet allongé, l'électricité se concentre dans les bouts.
- 2) dans un objet plat, l'électricité se concentre sur les bords.
- 3) dans un objet dont la courbure varie, la densité des charges électriques est plus grande là où la courbure est la plus prononcée.

Ça se comprend

Les deux premières conclusions sont la conséquence directe du fait que les

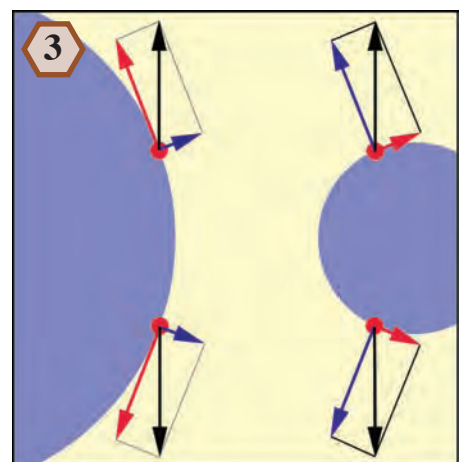
charges électriques se repoussent et sont libres de se déplacer à la surface du conducteur.

La troisième se comprend à l'aide de la **figure 3**. Puisque les charges électriques se déplacent à la surface des conducteurs, c'est la composante des forces parallèles à la surface (flèches rouges sur la figure) qui fera se déplacer les charges.

Or, comme nous le montre la figure, pour une même distance entre deux charges électriques, c'est sur la surface la plus courbée (la sphère la plus petite) que les composantes horizontales des forces de répulsion sont les plus faibles. L'électricité pourra donc s'y concentrer plus facilement, d'où sa densité plus grande.

Le pouvoir des pointes

Coulomb explique le pouvoir des pointes métalliques (voir l'**épisode 2-9**) par la très grande densité des charges électriques induites sur le bout de la pointe, où la courbure est très prononcée. Celles-ci électrisent l'air environnant, lequel va décharger l'objet électrisé qui induit les charges sur la pointe.



Décomposition des forces de répulsion (flèches noires) entre deux charges électriques semblables (cercles rouges), à la surface de deux sphères conductrices de différents diamètres. Les flèches bleues et rouges représentent respectivement les composantes perpendiculaires et parallèles à la surface des sphères.

Au laboratoire

Construisons d'abord un petit électromètre sensible, plus facile à fabriquer que la balance de **Coulomb**.

Dans la paroi d'une bouteille en plastique de 12 à 15 cm, fais une ouverture, tel qu'illustré sur la **figure 4**, en enlevant les deux tiers du périmètre, sur 5 à 6 cm de hauteur. Demande à un adulte expérimenté de percer, dans le goulot, deux trous diamétralement opposés d'environ 3 mm de diamètre à l'aide d'une perceuse. La bouteille ainsi préparée servira de structure de soutien pour un « pendule électrique ».

Dans une paille en plastique, taille un bout de 15 cm de longueur et fais-y pénétrer, au travers, à 10 cm, une aiguille à coudre de 4 cm. Cette dernière constituera le pivot du pendule. Taille en pointe l'extrémité de la paille située à 10 cm de l'aiguille, et entoure l'autre extrémité avec une bande de 2 cm en papier d'aluminium, que tu fixeras avec du ruban adhésif.

Découpe, à même un bout de paille inutilisé, une petite bande de plastique de 4 cm de long sur 1,5 mm de large, avec laquelle tu feras un arceau qui enjambe la bande d'aluminium. Pour faire tenir cet arceau, pratique deux petites ouvertures dans la paille, à l'aide d'une aiguille, et fais-y pénétrer ses extrémités.

Installe le pivot du pendule dans les trous du goulot de la bouteille. Pour rendre ton pendule plus facile à déplacer, ajoute, petit à petit, de la pâte à modeler, en contrepoids, à l'extrémité supérieure de la paille, jusqu'à ce que le temps pour une oscillation du pendule soit ralenti à environ deux secondes.

Sur un morceau de carton carré de 15 cm de côté, trace, avec un rapporteur d'angles, des lignes à tous les 5 degrés, en partant du centre de l'un

des côtés du carré. La ligne de 0 degré passe par le centre du carré et les autres couvrent 25 degrés de chaque côté. Découpe le carton comme sur la **figure 4**, de manière à ce que toutes les lignes convergent vers le pivot. Pour fixer le morceau de carton, pratique quatre petites incisions dans la paroi de la bouteille.

Découpe une rondelle de 12 mm de diamètre dans du papier d'aluminium et fixe-la, avec du ruban adhésif, à l'extrémité d'un bâtonnet de plastique servant à brasser le café. Tu disposeras ainsi d'un échantillonneur d'électricité.

Pour commencer, vérifie avec ton détecteur à fils (**épisode 2-4**) que les pièces de ton électromètre ne sont pas électrisées. Si c'est le cas, décharge-les en les tenant dans ta main et en envoyant ton haleine sur elles. Il faut également que ton pendule puisse faire quatre ou cinq bonnes oscillations. Sinon, nettoie l'aiguille et les trous du goulot pour qu'ils soient lisses. Ajuste également ton pendule à 0 degré



À l'aide de cet électromètre simple et sensible, tu pourras vérifier comment se répartit l'électricité sur le plateau électrisé de ton électrophore (épisode 2-7).

Matériel requis

- l'électrophore (épisode 2-7)
- du papier d'aluminium
- un bâtonnet en plastique pour brasser le café
- une petite bouteille en plastique de 12 à 15 cm
- une paille en plastique
- une aiguille à coudre
- du ruban adhésif
- de la pâte à modeler
- un morceau de carton
- le détecteur à fils (épisode 2-4)

en déplaçant la boulette de pâte à modeler.

Électrise le plateau de l'électrophore (**épisode 2-7**) et dépose-le à l'envers (**figure 4**), sans le décharger. Prélève un peu d'électricité sur son bord, avec le disque de l'échantillonneur, et transfère-en sur la bande d'aluminium du pendule, en la touchant avec le disque.

Tu peux, maintenant, prendre des échantillons, à différents endroits sur le plateau électrisé, et les mesurer. À chaque prélèvement, approche le disque d'aluminium de l'échantillonneur, près de la bande électrisée du pendule, jusqu'à ce que le disque touche à l'arceau. En procédant ainsi, tu présentes toujours le disque à la même distance de la bande, et la force de répulsion entre les deux, responsable de l'inclinaison du pendule, ne dépend plus que de la charge sur le disque.

On démontre, en mécanique, que pour des angles inférieurs à 20 degrés environ, l'angle d'inclinaison du pendule est proportionnel à la force appliquée (la force électrique dans notre cas). *Donc, l'angle d'inclinaison du pendule est proportionnel à la charge électrique sur le disque.*

Pour en savoir plus

- *Mémoires relatifs à la physique*, C. A. COULOMB, Librairie scientifique et technique Albert Blanchard, Paris, 2002.

En l'an 1837

Un peu d'histoire

Nous avons vu, dans les **épisodes 2-3 et 2-6**, que les corps conducteurs avaient une grande influence sur la transmission des forces électriques.

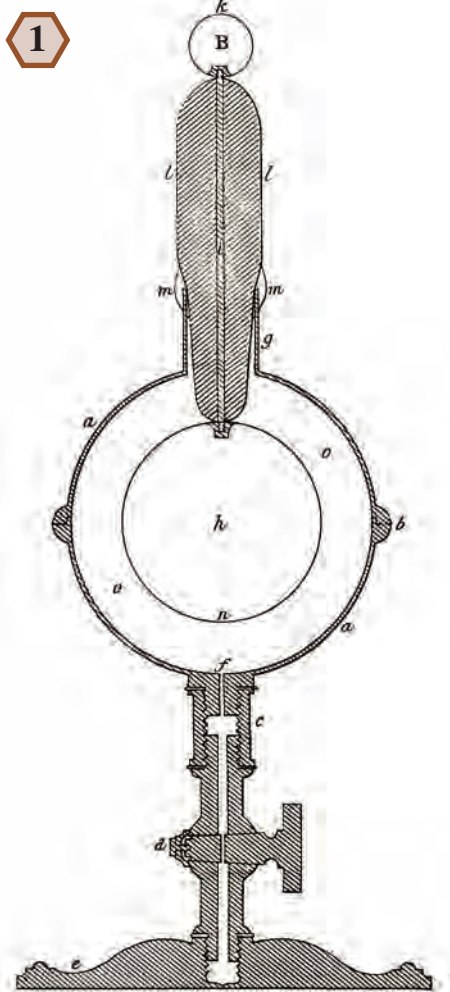
Mais qu'en est-il des corps isolants? Est-ce qu'ils influencent la transmission des forces électriques? **Michael Faraday**, un illustre savant anglais du 19^e siècle, est persuadé que oui.

Une bouteille de Leyde variable

Pour le démontrer et explorer la nature de cette influence, **Faraday** conçoit une expérience avec deux **condensateurs**, sous la forme de bouteilles de Leyde sphériques, dont le matériau isolant pouvait être changé à volonté (voir l'**épisode 2-8**).

La **figure 1** nous montre la construction de ces condensateurs sphériques. La sphère métallique intérieure **n** est reliée par une tige métallique **i** à un bouton sphérique métallique **k** au sommet de l'appareil. Un manchon isolant **l** isole cet ensemble de la structure métallique extérieure **a**. Cette dernière est constituée de deux coquilles hémisphériques détachables et d'un pied métallique **ce**. Dans ce pied, on a pratiqué un petit conduit **f** qui permet de faire pénétrer un liquide isolant **o** dans l'appareil. Un robinet **d** permet d'ouvrir ou de fermer ce conduit. Pour introduire une substance isolante solide, au lieu d'un liquide, il suffit de séparer les deux coquilles hémisphériques.

L'idée de **Faraday** était de vérifier l'influence que pouvaient avoir différentes substances isolantes, qu'il appelle substances **diélectriques**, sur la quantité d'électricité qu'on peut emmagasiner dans une telle bouteille de Leyde. Il fallait toutefois s'assurer d'appliquer une même force électrique pour faire pénétrer les charges dans chaque bouteille, afin que la comparaison soit valable.



Appareil de Faraday pour l'étude des propriétés diélectriques des matériaux (Musée de la civilisation, bibliothèque du Séminaire de Québec. Faraday, Michael, *Experimental Researches in Electricity*, London, 1849).

Comparer deux bouteilles différentes

Pour mesurer les charges électriques dans les bouteilles, **Faraday** utilise une balance à torsion comme celle de **Coulomb** (**épisodes 2-11 et 2-12**). Il prélève d'abord une portion des charges électriques à l'aide d'une petite sphère métallique fixée à un manche isolant, en la mettant en contact avec le bouton métallique au sommet de la bouteille. Il insère ensuite cette petite sphère chargée dans la balance afin d'en mesurer la charge.

Dans le déroulement de son expérience, **Faraday** commence par prendre

deux bouteilles identiques dont la substance isolante est l'air. Il charge une des bouteilles avec un électrophore (**épisode 2-7**) et mesure sa charge électrique avec la balance à torsion. Ensuite, il met en contact la bouteille chargée avec la bouteille identique non chargée, en faisant se toucher les boutons sphériques à leur sommet. Il vérifie alors que chacune des bouteilles se retrouve avec la moitié de la charge initiale.

Notre savant continue en gardant toujours une bouteille remplie d'air et en variant la substance diélectrique dans la deuxième bouteille. Il charge la bouteille remplie d'air, mesure sa charge, la met ensuite en contact avec la deuxième bouteille et mesure à nouveau la charge de la première bouteille. Il peut ainsi déterminer quelle charge est allée dans chaque bouteille et les comparer.

En procédant ainsi, **Faraday** s'assure que les forces électriques qui poussent les charges dans les bouteilles sont les mêmes pour les deux bouteilles. En effet, ces forces s'équilibrent lorsqu'on met les deux bouteilles en contact.

La constante diélectrique

Notre talentueux expérimentateur met à l'épreuve diverses substances diélectriques, comme la résine durcie, le verre et le soufre. Il découvre ainsi qu'un condensateur dont la substance isolante est du soufre peut emmagasiner plus d'électricité qu'un condensateur utilisant du verre. Par ailleurs, ce dernier peut accumuler plus d'électricité qu'un condensateur rempli de résine, lequel en emmagasine davantage qu'un condensateur rempli d'air.

Afin de quantifier les propriétés diélectriques d'un matériau, on définira plus tard la **constante diélectrique**. Plus cette constante est élevée pour un matériau et plus un condensateur électrique construit avec ce matériau pourra emmagasiner d'électricité.

Plus mince c'est mieux

Nous avons vu à l'**épisode 2-8** qu'on peut accumuler plus d'électricité dans un condensateur que dans un objet métallique de mêmes dimensions. Pour comprendre ce qui se passe, nous avons fait remarquer qu'en voulant accumuler des charges électriques semblables sur une plaque métallique, ces charges vont se repousser et exiger de plus en plus de forces électriques si on veut augmenter leur quantité sur la plaque. Or, un condensateur possède toujours deux plaques ou armatures métalliques séparées par un isolant. Ces deux plaques se chargeant d'électricités contraires, on comprend pourquoi il est plus facile d'y accumuler l'électricité sur chacune des plaques. En effet, la répulsion mutuelle des charges de même signe, sur une plaque, est atténuée par l'attraction des charges contraires de l'autre plaque. Cette atténuation sera d'autant plus importante que les deux plaques sont rapprochées.

Ainsi, un condensateur dont le matériau diélectrique est plus mince pourra emmagasiner plus d'électricité. On dit que le condensateur a une plus grande **capacité**. Notons que ce fait avait été constaté quelques années seulement après la découverte de la bouteille de Leyde.

Faraday comprenait bien ces raisonnements. Aussi, lorsqu'il constate que la capacité de sa bouteille de Leyde augmente en y insérant un diélectrique, il réalise que tout se passe comme si les deux parois métalliques de son condensateur étaient plus près l'une de l'autre. Mais comme ce n'est pas le cas, il se dit qu'il doit y avoir, dans le diélectrique lui-même, l'apparition de surfaces électrisées près de chacune des parois métalliques du condensateur.

Des molécules « polarisées »

Notre savant explique l'apparition de ces surfaces électrisées en faisant appel au concept de l'**induction électrostatique** que nous avons étudié à l'**épisode 2-6**. Toutefois, il sait que dans un corps diélectrique (isolant), les charges électriques ne sont pas libres

de circuler comme dans un conducteur. Il imagine donc une forme différente d'induction qu'il décrit comme suit :

*L'induction semble consister en un certain état **polarisé** des particules [composant un corps diélectrique], dans lequel elles sont mises par le corps électrisé qui soutient l'action, les particules présentant des points ou parties positifs et négatifs, lesquels sont arrangés de façon symétrique l'un par rapport à l'autre et par rapport aux surfaces inductrices.**

Faraday utilise le mot « particule » et non « atome » ou « molécule », car à son époque la théorie atomique de la matière n'était pas finalisée et plusieurs scientifiques s'y opposaient. Mais aujourd'hui on sait que ce sont les atomes ou molécules des corps diélectriques qui se polarisent.

En se référant à la **figure 2**, on peut mieux comprendre ce qui se passe à l'intérieur d'un condensateur dont les deux plaques métalliques (en bleu) sont séparées par une substance diélectrique.

Tout d'abord, comme nous l'avons vu dans les **épisodes 2-5** et **2-6**, toute matière comporte une quantité égale des deux électricités. En fait, au début du 20^e siècle, on a découvert que chaque atome et chaque molécule de matière, dans leur état normal, possèdent un

nombre égal de protons, dont la charge électrique est positive, et d'électrons, dont la charge est négative. Par conséquent, la charge électrique totale d'un atome ou d'une molécule est nulle. On dit qu'ils sont neutres.

Malgré cette neutralité des molécules, les forces électriques entre les deux plaques d'un condensateur déforment en quelque sorte les molécules, en attirant leurs électrons négatifs du côté de la plaque positive du condensateur. Il en résulte que la distribution des charges électriques à l'intérieur d'une molécule n'est plus homogène. Cette distribution déformée ressemble alors aux ellipses orange sur la **figure 2**.

Un « bout » de molécule se retrouve ainsi chargé négativement et l'autre bout positivement, avec une portion d'électricité dans les « bouts » qui est plus ou moins grande selon la substance considérée. Puisque les « bouts » des molécules qui se touchent sont chargés d'électricités contraires, leurs effets s'annulent. Seuls les « bouts » de molécules directement en contact avec les plaques du condensateur ont un effet non nul.

Le résultat de tout ceci est que chaque surface du diélectrique qui touche à une plaque métallique du condensateur semble porter une charge électrique contraire à celle de la plaque. Cette surface chargée étant plus près de la plaque que ne l'est l'autre plaque, le condensateur se retrouve avec plus de capacité.

Des forces électriques réduites

Mais oublions les condensateurs et examinons simplement comment se comportent les forces électriques lorsqu'on plonge un objet chargé d'électricité dans un milieu diélectrique, comme de l'huile.

Cet objet se verra entouré d'une mince couche d'électricité contraire à la sienne, en raison de la polarisation des molécules diélectriques, ce qui aura pour effet de diminuer les forces électriques autour de lui.

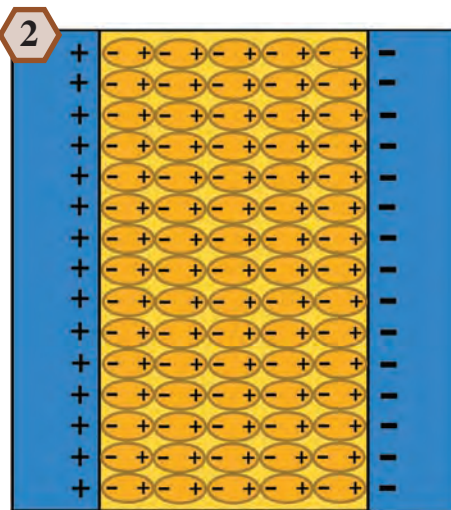


Schéma illustrant la polarisation des molécules diélectriques (ellipses orange) entre les deux plaques métalliques (en bleu) d'un condensateur chargé d'électricité.

* *Experimental Researches in Electricity*, Michael FARADAY, 3 volumes, édition originale à Londres, 1839-1855. Nouvelle édition : Green Lion Press, Santa Fe, New Mexico, 2000, volume 1, p. 409, paragraphe 1298.

De 1770 à 1843

Un peu d'histoire

La balance à torsion de **Coulomb** (épisodes 2-11 et 2-12) permet de mesurer des charges électriques. Toutefois, cet instrument est très délicat et peu pratique pour les travaux de tous les jours.

L'électromètre de Henley

En 1770, **Henley** mit au point son électromètre à cadran, dont la partie mobile est une fine tige d'ivoire (conducteur) terminée par une petite balle de sureau (figure 1). L'électricité se distribue sur le poteau métallique vertical et se répand sur la tige mobile. Il y a donc une répulsion entre la tige et le poteau, et le cadran permet de lire l'angle de la tige.

L'électromètre était fixé à une machine électrostatique pour en indiquer l'état d'électrisation.

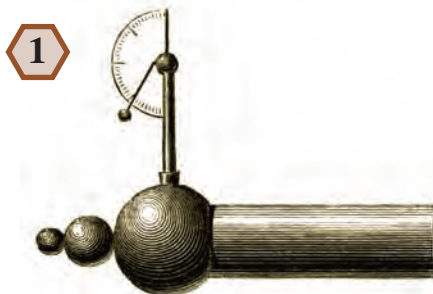
Toutefois, le lien exact entre l'angle de déviation de la tige et la quantité d'électricité sur la machine n'est pas évident. On en avait seulement une estimation grossière, en comptant le nombre de tours de manivelle. Deux tours devant donner deux fois plus d'électricité qu'un tour.

Des feuilles d'or

Un instrument portatif et plus sensible a été mis au point par **Bennet** en 1786 (figure 2). Il s'agit d'une bouteille de verre qui sert de support et d'isolant électrique à un petit plateau métallique relié à deux feuilles d'or ultra-fines, à l'intérieur de la bouteille, par des matériaux conducteurs. Les feuilles d'or se repoussent lorsqu'on approche un objet électrisé du plateau.

Lorsqu'on installe des graduations, pour lire l'angle entre les feuilles d'or, on appelle cet appareil un électromètre à feuilles d'or. Sans graduations, on parle plutôt d'un électroscope.

En utilisant toujours une même sphère métallique, munie d'un manche isolant, pour déposer une charge



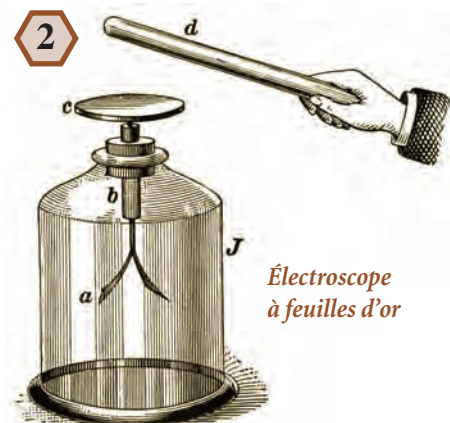
Électromètre de Henley installé sur le gros conducteur d'une machine électrostatique.

électrique sur le plateau, l'électricité se partagera toujours dans les mêmes proportions entre le plateau et la sphère. Si la sphère porte deux fois plus d'électricité, il s'en déposera deux fois plus sur le plateau.

On pourra alors calibrer l'électromètre en notant l'angle entre les feuilles d'or pour des charges Q , $2Q$, $3Q$, $4Q$... On obtient facilement des multiples d'une charge donnée en prenant une sphère métallique chargée, sur un pied isolant, et en la mettant en contact avec d'autres sphères identiques, non chargées (épisode 2-12).

Mais, si on emploie un objet métallique de forme différente, pour déposer les charges sur l'électromètre, la portion d'électricité qui ira sur le plateau sera également différente, ce qui n'est pas très pratique.

Par ailleurs, si on veut mesurer une charge électrique sur un objet isolant, le transfert d'électricité entre cet isolant et le plateau est très complexe. Il dépend de la façon dont on



Électroscope à feuilles d'or

met en contact l'isolant avec le plateau de l'électromètre, de même que de la durée de ce contact, sans compter que des isolants différents se comportent différemment.

Le cylindre de Faraday

Tous ces problèmes furent résolus, en 1843, lorsque **Michael Faraday** eut l'idée de placer un contenant métallique cylindrique, ouvert à sa partie supérieure, sur le plateau d'un électromètre à feuilles d'or (figure 3).

Il descendit alors une sphère métallique électrisée, attachée au bout d'un fil de soie (isolant), dans le cylindre métallique, jusqu'à ce que la sphère touche au fond du cylindre. En retirant la sphère, il constata qu'elle n'était plus électrisée. Toute son électricité avait été transférée au cylindre. Peu importe la forme du conducteur qu'il met en contact avec le fond du cylindre, la charge électrique qu'il porte est toujours transférée entièrement au cylindre, pourvu que l'ouverture supérieure du cylindre soit environ deux fois plus petite que sa hauteur. Souviens-toi, nous avons vu, à l'épisode 2-10, que l'électricité se retrouve toujours sur la surface extérieure d'un contenant métallique creux.

Faraday fait une autre observation très importante. Au fur et à mesure qu'il descend la sphère électrisée dans le cylindre, les feuilles d'or de l'électromètre s'écartent (indiquant la présence d'électricité induite, épisode 2-6) et atteignent un angle maximum avant que la sphère touche au fond. Cet écartement reste inchangé, même après que la sphère eut touché au cylindre et transféré toute son électricité sur celui-ci.

Cette dernière observation lui fait réaliser qu'il peut mesurer la charge électrique sur un objet électrisé, sans avoir à transférer l'électricité de l'objet à l'électromètre. On peut donc mesurer la charge électrique sur un objet isolant.

Au laboratoire

Nous allons reconstituer l'expérience du cylindre de Faraday.

Procure-toi un pot en verre d'environ 15 cm de hauteur, avec un couvercle de plastique, et une boîte de conserve métallique vide de 8 cm de diamètre et de 12 cm de hauteur approximativement. Tu auras besoin d'une vis de mécanique de 12 à 15 mm de longueur et de 3 ou 4 écrous pour fixer le fond de la boîte au couvercle du pot.

Mais il te faut d'abord construire le support pour les languettes de papier d'aluminium, qui remplaceront les feuilles d'or. Ce support est réalisé à l'aide d'un gros trombone métallique



Version domestique de l'expérience de Faraday, avec un électroscope à cylindre.

déplié et redressé avec une pince. Plie, ensuite, cette petite tige métallique pour lui donner la forme illustrée sur la **figure 4**. Les deux portions horizontales, du bas de ce support, ont 12 mm de longueur et sont distantes de 3 à 4 mm.

Pour fixer la boîte de conserve au couvercle de plastique, demande à un adulte expérimenté de percer un trou au centre du couvercle et un autre au centre du fond de la boîte. Cette personne devrait utiliser une perceuse et une *mèche à métal* dont le diamètre est légèrement supérieur au diamètre de ta vis. Passe la vis à travers la partie supérieure recourbée de ton support, la tête en bas, et visse deux ou trois écrous pour bien serrer le support. Le nombre d'écrous sert à ajuster la longueur du bout de la vis qui va dépasser à l'intérieur de la boîte de conserve. Après avoir fait pénétrer la vis à travers le couvercle de plastique et le fond de la boîte, la vis ne devrait pas dépasser de plus de 3 mm, soit l'épaisseur de l'écrou que tu utiliseras pour fixer la boîte au couvercle. Sers-toi d'une pince pour serrer ce dernier écrou.

À la place des feuilles d'or, nous allons utiliser du papier d'aluminium. Taille, avec des ciseaux, deux languettes en forme de trapèze allongé, ayant une hauteur de 6 cm, une largeur de 1,2 cm à sa base, et de 0,8 cm à son sommet. Arrondis les quatre coins et replie l'extrémité la plus étroite autour du support, de manière à obtenir la forme de languette illustrée sur la **figure 4**. Enfile les deux languettes sur les branches horizontales du support et assemble le tout.

Afin de compléter l'expérience de **Faraday**, il nous faut une petite sphère métallique d'environ 4 cm de diamètre. Utilise un petit contenant métallique pour les infusions. Suspend ce contenant à l'aide d'un bout de fil à coudre 100 % polyester, et attache l'autre bout du fil à la coque en plastique d'un vieux stylo (**figure 3**).

Pour charger la sphère métallique, utilise ton électrophore construit à l'**épisode 2-7**. Vérifie qu'elle est bien

Matériel requis

- l'électrophore (épisode 2-7)
- le *versorium* (épisode 2-1)
- un pot en verre de 15 cm de haut (couvercle en plastique)
- une boîte de conserve métallique de 8 cm de diamètre et 12 cm de hauteur environ
- un petit contenant métallique sphéroïdal, pour les infusions
- un vieux stylo en plastique
- du fil à coudre 100 % polyester
- du papier d'aluminium
- un gros trombone métallique
- une vis de 12 mm à 15 mm avec 3 ou 4 écrous

chargée à l'aide de ton *versorium* (épisode 2-1).

Tu es maintenant prêt à reproduire les expériences de **Faraday** décrites à la page précédente.

Tu pourras même vérifier l'égalité des charges de signes contraires, dans l'expérience du capuchon de **Faraday** (épisode 2-5). Ne frotte que le bout du tuyau et du manchon (3 à 4 cm). Fais pénétrer, ensuite, le bout électrisé du tuyau à l'intérieur de la boîte de conserve, sans que le tuyau touche à la boîte. Fais de même avec le bout électrisé du manchon, et compare l'écartement des languettes d'aluminium de l'électroscope.



Détails d'une languette de papier d'aluminium, de son support métallique, de la vis et des écrous.

Pour en savoir plus

- *Experimental Researches in Electricity*, Michael FARADAY, 3 volumes, édition originale à Londres, 1839-1855. Nouvelle édition : Green Lion Press, Santa Fe, New Mexico, 2000, volume 2, p. 279 à 284.

En l'an 1843

Un peu d'histoire

Nous avons vu, à l'épisode 2-10, que les forces électriques ne pénètrent pas à l'intérieur d'une enceinte métallique (cage de **Faraday**) lorsque des objets électrisés sont situés à l'extérieur.

Mais qu'est-ce qui se passe lorsque les objets électrisés sont à l'intérieur de l'enceinte métallique et qu'on observe les forces électriques à l'extérieur?

Faraday expérimente

C'est en expérimentant avec son électroscope à cylindre et une sphère métallique chargée (épisode précédent) que **Faraday** trouve la réponse à cette question, en 1843.

Notre grand savant anglais (figure 1) descend la sphère chargée, à l'intérieur du cylindre métallique de son électroscope, en la tenant par un fil de soie (isolant électrique) et en prenant soin que la sphère ne touche pas au cylindre. Tout au long de cette opération, les feuilles d'or de l'électroscope s'écartent progressivement jusqu'à un angle maximal, lorsque la sphère a bien pénétré à l'intérieur du cylindre. Vu de l'extérieur, le cylindre apparaît porter une charge électrique, puisque les feuilles d'or s'écartent.

Alors que les feuilles sont écartées à leur maximum et que la sphère chargée, à l'intérieur du cylindre, ne touche pas à celui-ci, **Faraday** touche du doigt l'extérieur du cylindre. Ce geste permet aux charges de circuler entre le cylindre et la terre, à travers son corps. Or, au moment précis où il touche le cylindre, les feuilles d'or de l'électroscope tombent, et le cylindre n'apparaît plus chargé d'électricité. De plus, après ce contact du doigt, aucune force électrique n'est décelable à l'extérieur du cylindre, sauf près de son ouverture. Pourtant, l'électricité sur la sphère, à l'intérieur, est toujours présente!

Une enceinte métallique ou cage de **Faraday**, lorsqu'elle est mise en contact



1

Michael Faraday (1791-1867)

avec la terre, agit donc comme un écran qui bloque les forces électriques en provenance des objets à l'intérieur, et ne laisse pas ces forces se répandre à l'extérieur.

Par conséquent, en effectuant une mise à la terre d'une cage de **Faraday**, celle-ci fonctionne dans les deux sens. Elle empêche les forces électriques de l'extérieur d'y pénétrer, et elle empêche également les forces électriques de l'intérieur de se répandre à l'extérieur.

Une redistribution des charges

Faraday fait valoir que si les choses se passent de la sorte, c'est à cause du phénomène d'induction électrostatique (épisode 2-6).

Pour mieux comprendre, reporte-toi à la figure 2. On y voit une sphère métallique creuse, sur un pied isolant. Cette sphère a un couvercle métallique qui lui est intégré et auquel est attachée, à l'aide d'un fil isolant, une petite sphère chargée d'électricité positive.

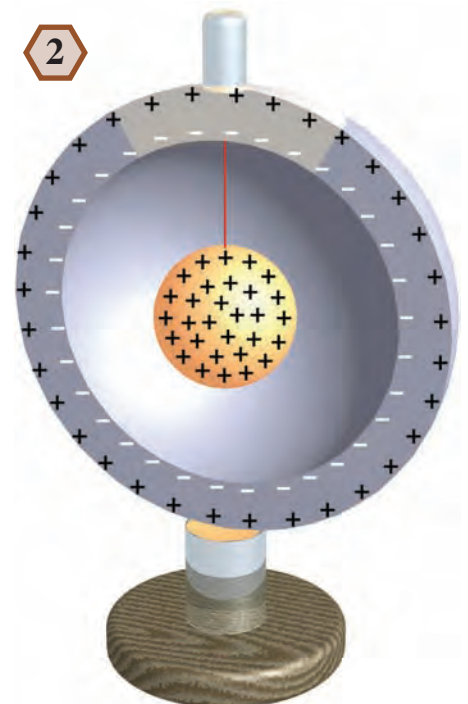
La sphère positive, au centre, va attirer les charges négatives de la sphère creuse sur sa surface intérieure. La surface extérieure, elle, apparaîtra chargée positivement. La quantité d'électricité sur chacune des surfaces est la même que la quantité sur la sphère centrale.

Une fois que la redistribution des charges est établie dans la paroi de la sphère creuse, les charges positives de la surface extérieure se comportent comme s'il n'y avait pas de charges à l'intérieur. En effet, les charges négatives, induites sur la surface intérieure, annulent l'effet des charges positives sur la sphère centrale.

Donc, si on touche du doigt la sphère creuse (mise à la terre), sa surface extérieure va se décharger, comme si les charges positives étaient à la surface d'une sphère métallique sans rien à l'intérieur.

Par la suite, les forces électriques vont être nulles à l'extérieur de la sphère creuse, à cause de l'annulation des forces dont nous venons de parler.

Nous verrons, à l'épisode 2-19, une application plutôt spectaculaire des cages de **Faraday** (dans les deux sens), à l'impressionnant «Théâtre de l'électricité» du **Museum of Science** de Boston.



L'induction électrostatique dans la paroi d'une sphère métallique creuse, causée par une sphère chargée au centre.

Au laboratoire

Pour cette expérience, prends une boîte de conserve métallique vide de 8 cm de diamètre et de 12 cm de hauteur environ. Place cette boîte sur un contenant en plastique renversé, de 4 cm de haut et de 15 cm de diamètre, plus ou moins.

Utilise le contenant à infusion métallique de l'épisode précédent et attache-le, à l'aide d'un fil à coudre 100 % polyester, au centre d'un petit tube en plastique (coque d'un vieux stylo). La longueur du fil doit être ajustée de manière à ce que le contenant à infusion soit suspendu, à l'intérieur de la boîte, à environ 1,5 cm du fond (**figure 3**).

Commence par vérifier, avec ton détecteur à fils (**épisode 2-4**), qu'aucun objet n'est électrisé. Prends ensuite l'électrophore (**épisode 2-7**) et, à l'aide de son plateau, dépose de l'électricité sur le contenant à infusion, en le tenant par le tube de plastique. Vérifie avec le détecteur à fils que le contenant à infusion est chargé positivement (il attire la bandelette de téflon et repousse le fil de nylon).

Maintenant, descends, très doucement, le contenant à infusion électrisé à l'intérieur de la boîte de conserve, en faisant très attention pour que le contenant à infusion ne touche pas à la boîte. Pendant cette opération, il ne faut pas, non plus, que tu touches à la boîte avec tes mains. La meilleure façon d'y arriver est de tenir le petit tube de plastique par les deux bouts, en utilisant les deux mains. Dépose doucement le tube sur le dessus de la boîte de conserve.

Si les choses ont été faites correctement, la bandelette de téflon de ton détecteur devrait être attirée par la boîte (**figure 3**).

Pendant que la bandelette de téflon pointe vers la boîte, touche du doigt l'extérieur de celle-ci. Tu verras qu'aussitôt, la bandelette tombe (**figure 4**). En fait, tu ne peux plus

détecter de forces électriques à l'extérieur de la boîte métallique. La surface extérieure de la boîte s'est déchargée à travers ton corps. En la touchant, tu as effectué ce qu'on appelle une mise à la terre.

Ce sont les charges négatives, induites sur la surface intérieure de la boîte métallique, qui annulent les forces électriques des charges positives du contenant à infusion.

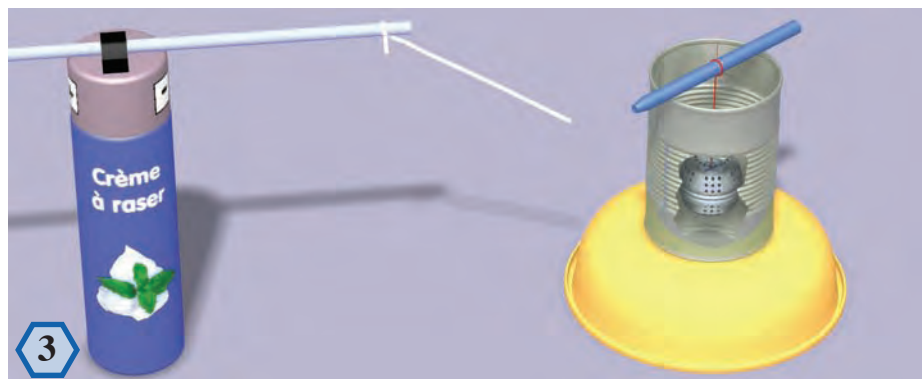
Pour t'assurer que la boîte est bien chargée négativement, après l'avoir touchée, retire délicatement le contenant à infusion de la boîte, sans que les deux se touchent. La boîte de conserve repoussera alors la bandelette de téflon de ton détecteur.

À ce moment, tu peux même vérifier que la quantité d'électricité est la même sur la boîte et sur le contenant à infusion. Tu n'as qu'à mettre en contact le contenant à infusion avec la boîte, pour que leurs électricités contraires se

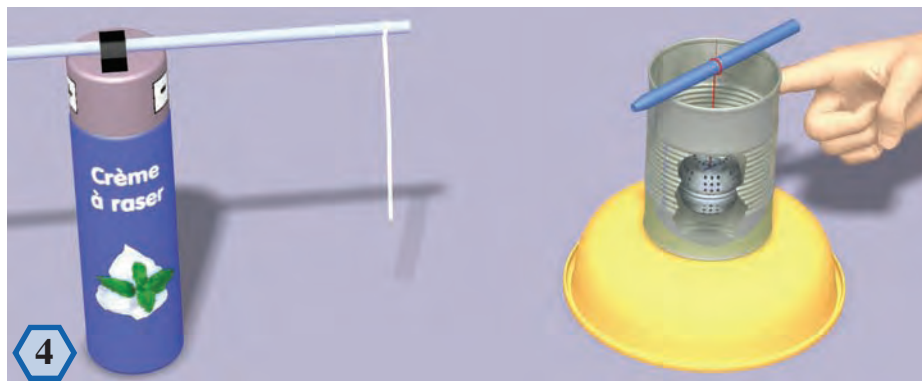
Matériel requis

- l'électrophore (**épisode 2-7**)
- le détecteur à fils (**épisode 2-4**)
- une boîte de conserve métallique de 8 cm de diamètre et de 12 cm de hauteur environ
- un petit contenant métallique sphéroïdal pour les infusions
- un vieux stylo en plastique
- du fil à coudre 100 % polyester
- un plat en plastique de 4 cm de haut et de 15 cm de diamètre

mélangent. Comme les deux électricités sont en quantités égales, la bandelette de téflon retombe, indiquant une charge totale nulle.



Introduis le contenant à infusion, chargé positivement par ton électrophore, dans la boîte de conserve, sans que le contenant à infusion touche à la boîte. Tu verras alors que la bandelette de téflon de ton détecteur est attirée par la boîte.



Touche la boîte de conserve avec ton doigt, pendant que le contenant à infusion chargé est à l'intérieur. La bandelette de téflon tombe aussitôt.

Pour en savoir plus

- *Experimental Researches in Electricity*, Michael FARADAY, 3 volumes, édition originale à Londres, 1839-1855. Nouvelle édition : Green Lion Press, Santa Fe, New Mexico, 2000, volume 2, p. 279 à 284.

De 1660 à 1782

Un peu d'histoire

La première machine électrostatique a été mise au point par **Von Guericke**, en 1660. Comme nous l'avons vu à l'**épisode 2-2**, il s'agit d'une boule de soufre fixée sur un axe. Une personne la fait tourner, alors qu'une autre maintient une pression sur la boule, avec ses mains. Le frottement génère de l'électricité statique en abondance.

Verre au plomb

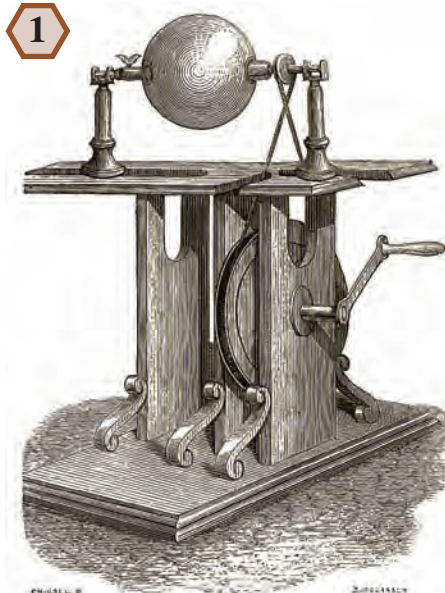
En 1706, le physicien anglais **Francis Hauksbee** introduit l'utilisation du **verre flint** pour générer de l'électricité statique. Ce type de verre, contenant du plomb, s'électrise plus facilement et plus fortement que les autres matériaux connus à l'époque. Les longs tubes de verre flint, frottés à la main, deviennent aussitôt l'outil de base des électriciens du 18^e siècle, tels que **Gray**, **Dufay** et **Franklin**.

En 1709, **Hauksbee** construit une machine électrostatique dans laquelle il remplace la boule de soufre de **Von Guericke** par un globe de verre au plomb (**figure 1**). Ce globe creux avait une ouverture munie d'une valve, ce qui permettait de faire le vide à l'intérieur.

Lueurs électriques

Hauksbee voulait ainsi étudier les phénomènes lumineux, causés par l'électricité, dans une enceinte où l'air est raréfié.

En effet, un phénomène curieux avait été observé en 1675 par l'abbé **Picard**, astronome à Paris. Alors que ce dernier transportait un baromètre, de nuit, il aperçut une lueur bleutée illuminant le vide dans le tube de verre du baromètre, toutes les fois qu'il le secouait brusquement.



Machine de Hauksbee (1709)

Hauksbee démontre qu'il s'agit là d'un phénomène électrique, causé par le frottement de la colonne de mercure avec le tube de verre. En fait, il peut reproduire les mêmes lueurs, sans le mercure. Il évacue simplement l'air d'un globe de verre et frotte ce dernier avec ses mains.

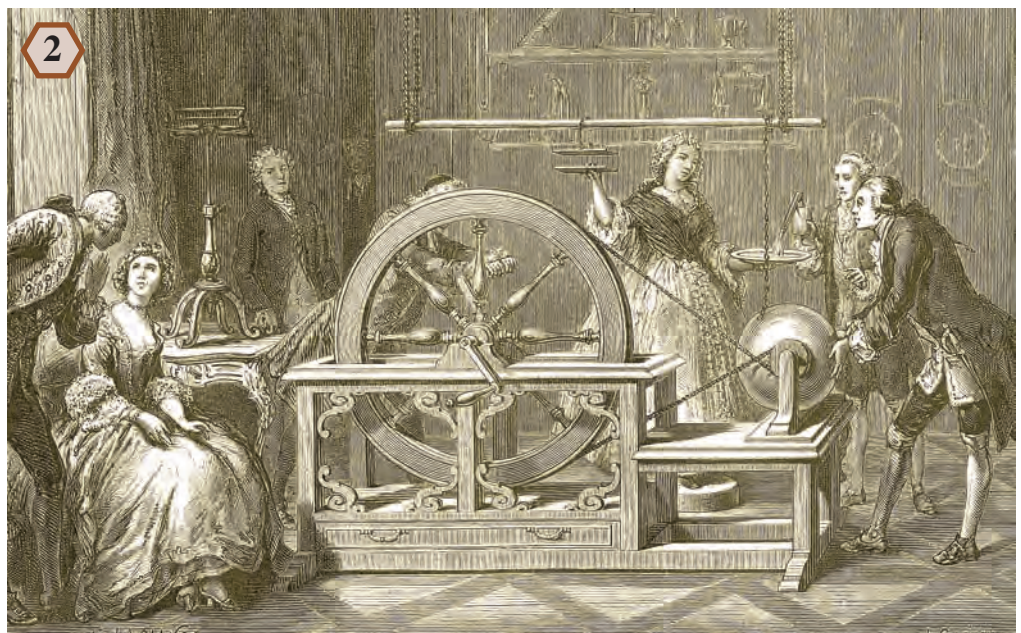
Avec sa nouvelle machine électrostatique, la lumière produite est

suffisamment intense pour qu'il puisse lire un livre dans une chambre complètement obscure!

Les travaux de **Hauksbee**, sur les décharges électriques dans l'air raréfié, sont à l'origine de l'éclairage moderne par tubes fluorescents.

Ce n'est qu'au début du 20^e siècle que nos connaissances sur les atomes, les molécules et l'électricité vont nous permettre de comprendre ce qui se passe. On sait, aujourd'hui, que ce sont les molécules d'air, dans le globe de verre, qui émettent de la lumière. Elles le font lorsqu'elles sont frappées par d'autres molécules, électrisées, qui ont atteint une vitesse suffisante, sous l'influence des forces électriques.

Lorsqu'il y a trop d'air dans le globe, les molécules électrisées ne peuvent atteindre la vitesse nécessaire, étant ralenties par les multiples collisions avec les nombreuses molécules. En évacuant de l'air du globe, les collisions sont moins nombreuses et les molécules électrisées peuvent atteindre une vitesse suffisamment grande pour produire de la lumière.



Machine électrostatique de l'abbé Nollet (1747). L'électricité collectée sur le globe de verre par une chaîne métallique s'accumule sur une barre métallique suspendue par des cordes de soie.

Accumulateur, coussin et pointes

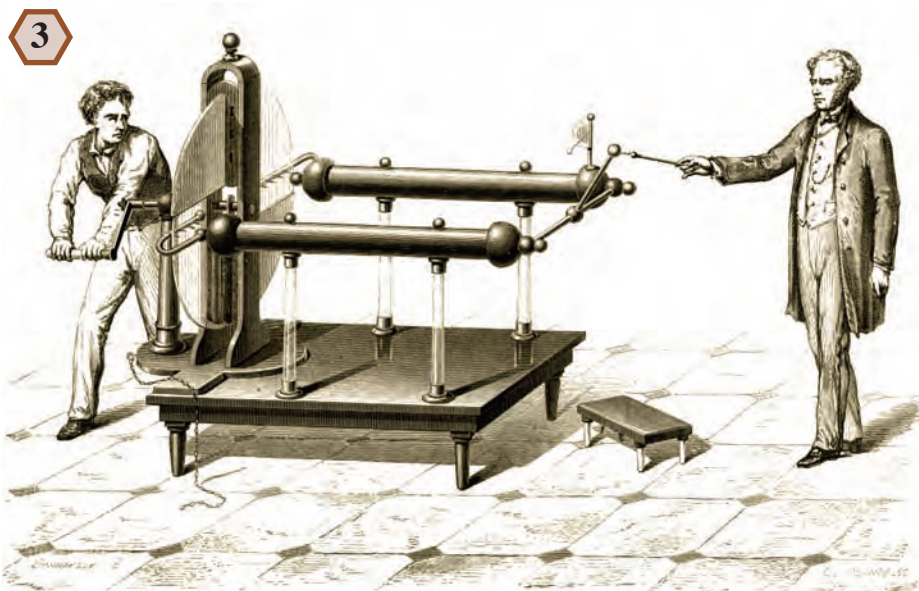
Pendant les trente années qui ont suivi les expériences de **Hauksbee**, les machines électrostatiques furent délaissées. Les physiciens se contentèrent d'utiliser les longs tubes de verre au plomb, beaucoup moins dispendieux et plus portables que les machines.

En 1733, le professeur allemand **Bose** reprend le flambeau et construit une machine électrostatique à globe de verre. Son enthousiasme à populariser ce type de machines contribue à l'essor de l'utilisation du verre dans les machines électrostatiques, au milieu du 18^e siècle.

Bose introduit également une modification importante qui consiste à recueillir l'électricité développée sur le verre. À cet effet, il employait un cylindre métallique, suspendu au plafond par des cordes de soie (isolant). Une chaîne métallique, entourée sur ce cylindre, descendait sur le globe de verre pour recueillir l'électricité. Le cylindre métallique servait, en fait, d'accumulateur d'électricité, et permettait d'obtenir des étincelles électriques plus intenses, lorsqu'on le déchargeait. La **figure 2** montre la machine électrostatique de l'abbé **Nollet** (1747), de la France, qui s'inspire de celle de **Bose**.

Dans les années 1740, l'Allemand **Winckler** apporte une innovation très pratique. Au lieu de frotter le globe de verre avec les mains, il utilise un coussin fixé à la machine. Les coussins, bourrés de crins de cheval, étaient revêtus de soie, de laine ou de cuir. C'est le cuir, plus résistant, qui deviendra d'usage courant. On l'enduisait de différentes substances pour augmenter l'efficacité de la machine.

Peu de temps après la découverte de l'effet des pointes par **Franklin** (**épisode 2-9**), **Wilson** utilise un peigne de pointes métalliques pour collecter plus efficacement l'électricité sur le cylindre de verre de sa machine, sans y toucher.



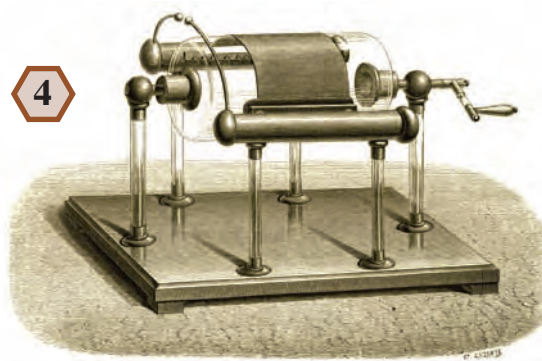
Machine de Ramsden (1768)

Dans la deuxième moitié du 18^e siècle, tous les morceaux étaient donc en place pour construire des machines électrostatiques à frottement beaucoup plus performantes.

La machine de Ramsden

En 1768, le fabricant d'instruments londonien **Jesse Ramsden** met au point une machine électrostatique tellement efficace qu'elle sera utilisée pendant une centaine d'années, jusqu'à l'apparition des machines à influence (**prochain épisode**).

Il s'agit d'une machine à plateau de verre (**figure 3**), dont le frottement est assuré par quatre coussins de cuir. Deux gros cylindres de laiton, sur pieds de verre et reliés, servent à accumuler l'électricité positive. Celle-ci est récoltée sur le disque de verre par des peignes de pointes métalliques. Des jaquettes de soie recouvrent le disque, afin de diminuer les pertes d'électricité. Par temps sec, une machine avec un plateau de 1,5 mètre de diamètre pouvait produire des étincelles de 50 centimètres.



Machine de Nairne (1782)

La machine de Nairne

Une machine pouvant accumuler les deux électricités fut conçue en 1782, par le physicien anglais **Nairne**. Le cœur de la machine était un cylindre de verre frotté par un coussin de cuir (**figure 4**).

La machine de **Nairne** possède deux cylindres de laiton sur pieds de verre. L'un d'eux, sur lequel est fixé un peigne métallique, collecte l'électricité positive du cylindre de verre. L'autre cylindre de laiton, sur lequel est fixé le coussin de cuir, collecte l'électricité négative qui se développe sur ce dernier, lors du frottement. L'étincelle électrique jaillit entre deux arcs métalliques fixés aux deux « cylindres accumulateurs ».

Pour en savoir plus

- *Le monde physique: Le magnétisme et l'électricité*, Amédée GUILLEMIN, Librairie Hachette et Cie, Paris, 1883.
- *Les Merveilles de la Science*, Louis FIGUIER, chez Furne Jouvett et Cie, volume 1, 1868.
- *Traité d'électricité statique*, M. E. MASCART, G. Masson, Paris, 1876.

Épisode 2-17

LES MACHINES ÉLECTROSTATIQUES À INFLUENCE

NIVEAU 3

De 1788 à 1883

Un peu d'histoire

Dans la deuxième moitié du 18^e siècle, des machines électrostatiques d'un nouveau genre ont vu le jour. Il s'agit de machines fonctionnant selon le principe de l'influence (induction électrostatique), que nous avons étudié à l'**épisode 2-6**.

Ces machines sont plus efficaces que les machines à frottement, qu'elles ont d'ailleurs remplacées, pour les expériences et les démonstrations sur l'électricité statique.

L'électrophore et les doubleurs

Le premier appareil à influence est l'électrophore, inventé par **Volta** en 1775 (**épisode 2-7**). Les ingénieurs ont ensuite imaginé diverses machines rotatives qui permettaient de réaliser des opérations similaires à celles d'un électrophore.

La première machine du genre a été mise au point par **Nicholson**, en 1788. Elle était constituée de trois disques métalliques isolés, dont un était mobile. Différents modèles ont vu le jour, et la **figure 1** nous montre l'un d'eux. On déposait une charge électrique sur l'un des deux disques fixes (le disque A sur la **figure 1**) et les mécanismes de contact

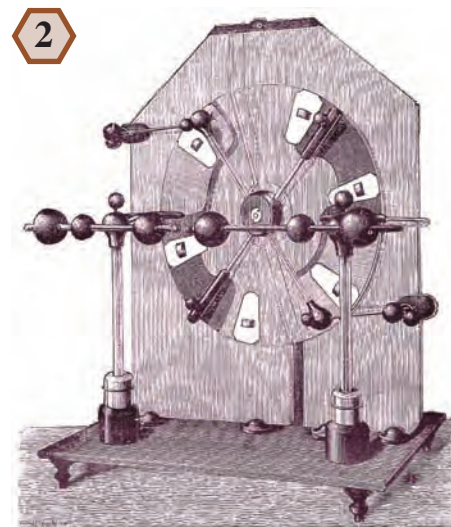
permettaient de doubler la charge électrique, sur ce disque, à chaque tour de la manivelle. Ces machines étaient d'ailleurs appelées des «doubleurs». En fait, c'est **Bennet** qui avait démontré, en 1787, qu'on pouvait doubler une charge électrique en utilisant deux électrophores superposés.

Ces premières machines à influence étaient toutefois moins efficaces qu'une bonne machine à frottement.

Des machines plus performantes

Il faudra attendre jusqu'en 1865 avant que deux inventeurs, **Holtz** et **Toepler**, imaginent deux machines à influence vraiment efficaces. Par temps sec, leurs machines pouvaient produire beaucoup plus d'électricité qu'une machine à frottement de Ramsden (**épisode précédent**) de mêmes dimensions.

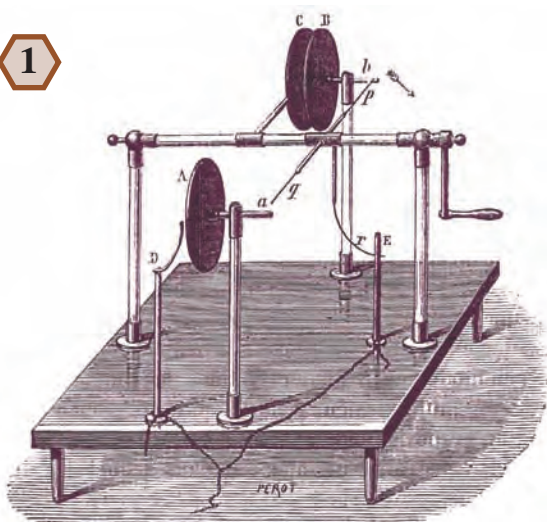
La **figure 2** nous montre un modèle à six segments de la machine de Toepler. Les segments, en étain, étaient collés sur un disque de verre, servant de support isolant, que l'on mettait en rotation. Deux plaques de verre fixes portaient chacune une bande d'étain que l'on chargeait d'électricités contraires, pour amorcer la machine. Ces bandes fixes constituent les inducteurs.



Machine de Toepler à six segments

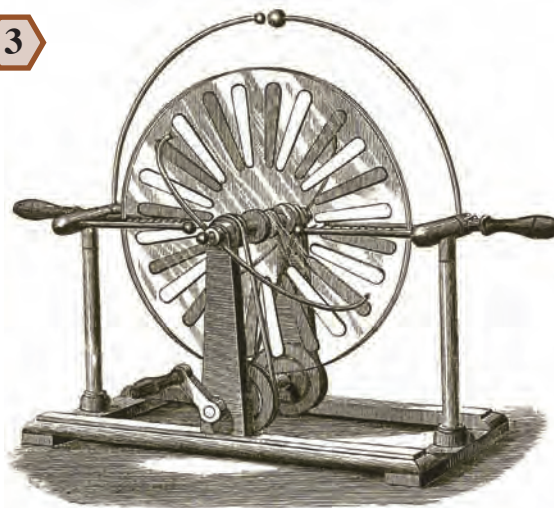
En faisant tourner le disque de verre, les segments diamétralement opposés sont mis en contact, un court instant, par un **connecteur** métallique (une tige munie de petits balais). À ce moment précis, un des deux segments fait face à l'inducteur chargé négativement, alors que l'autre segment fait face à l'inducteur chargé positivement. Les inducteurs vont donc produire, par influence, un transfert d'électricité entre les deux segments en contact. Ces derniers vont se retrouver chargés d'électricités contraires lorsque le contact entre les deux est rompu

1



Doubleur de Nicholson, inventé en 1788 (Musée de la civilisation, bibliothèque du Séminaire de Québec. Mascart, Éleuthère, «Traité d'électricité statique», Paris, 1876).

3



La machine de Wimshurst mise au point en 1883 (Musée de la civilisation, bibliothèque du Séminaire de Québec. «Wimshurst's New Electrical Machine» dans: Scientific American: An Illustrated Journal of Art, Science, and Mechanics, New York, Feb. 3, 1883).

(tout se passe comme dans l'expérience des deux boîtes de conserve de l'**épisode 2-6**). Plus loin dans leur rotation, les segments sont déchargés par des peignes métalliques.

La machine de Wimshurst

En 1883, **James Wimshurst**, un inventeur britannique, met au point une machine à influence qui s'amorce d'elle-même (**figure 3**). Cette machine s'est avérée tellement performante qu'elle est encore vendue et utilisée de nos jours pour les démonstrations d'électricité statique.

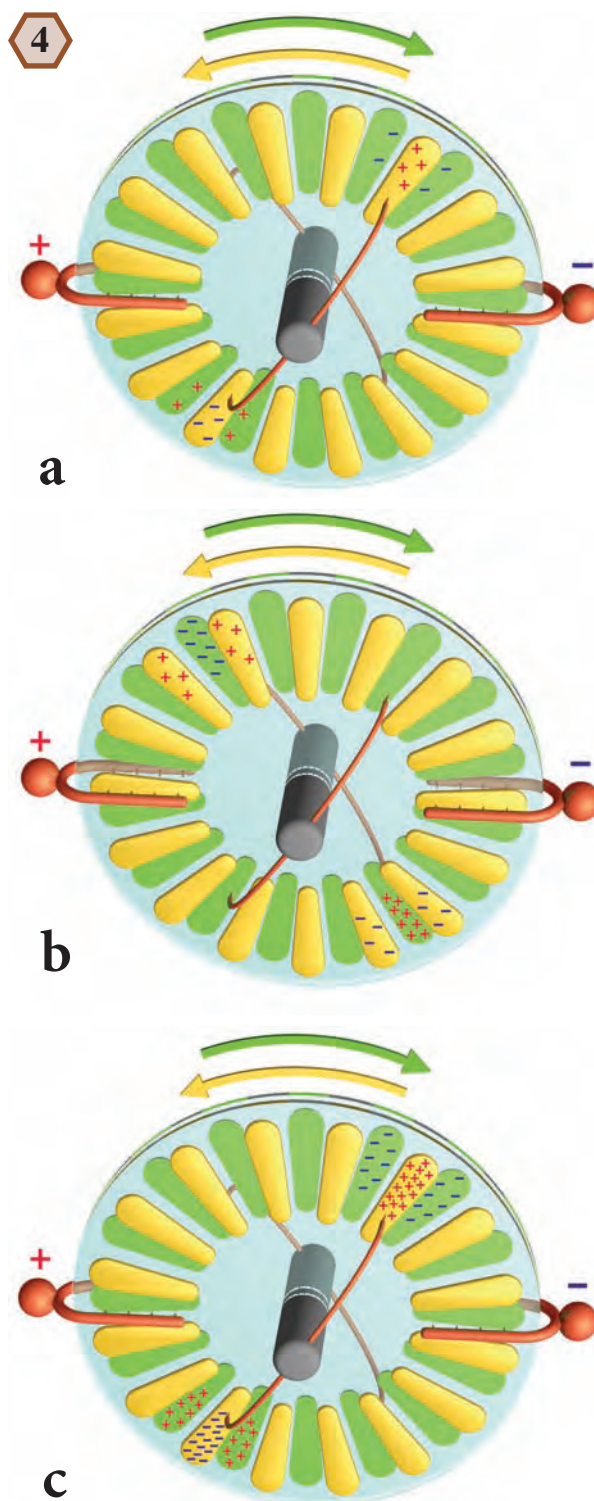
Elle est constituée de deux disques de verre ou d'ébonite (caoutchouc durci) qui servent de supports isolants à deux séries de segments conducteurs (en métal mou, comme l'étain, pour éviter les aspérités). Les deux disques tournent en sens inverse, **et les segments d'un disque servent d'inducteurs pour les segments de l'autre disque**. Deux connecteurs métalliques, un pour chaque disque, mettent en contact, deux par deux, les segments diamétralement opposés sur chaque disque (**figure 4**). Des peignes de pointes métalliques collectent l'électricité induite sur les segments.

L'électricité s'accumule sur deux petits cylindres métalliques isolés, sur lesquels sont fixées deux tiges métalliques recourbées et terminées par des boules en métal (**figure 3**). Lorsque l'électricité accumulée atteint un niveau suffisant, une décharge électrique se produit entre les deux boules. On peut également ajouter deux petites bouteilles de Leyde (**épisode 2-8**), reliées chacune à une borne de la machine, pour obtenir des décharges plus intenses.

Pour bien comprendre le fonctionnement de la machine de **Wimshurst**, reporte-toi à la **figure 4**. Les segments du disque d'en avant sont en jaune et ceux du disque arrière sont en vert.

Considérons, d'abord, les deux segments jaunes mis en contact par le connecteur, sur le disque d'en avant (**figure 4a**). Nous supposons que les segments verts qui sont juste derrière ont une légère charge négative pour ceux du haut et une légère charge positive pour ceux du bas. Ces charges, sur les segments verts, attireront des charges contraires sur les segments jaunes. **La quantité d'électricité induite sur les segments jaunes sera plus grande que celle qui existe sur chacun des segments verts, car les charges électriques de deux segments verts contribuent à induire les charges sur un seul segment jaune.**

Lorsque les segments jaunes, qui tournent dans le sens antihoraire, atteignent la position où ils sont vis-à-vis du connecteur du disque arrière (**figure 4b**), ils vont, à leur tour, induire des charges plus nombreuses sur les deux segments verts mis en contact par le connecteur arrière. En continuant leur rotation, les segments jaunes arrivent devant les peignes métalliques qui les déchargent. Les segments verts, qui viennent de se faire charger par induction, vont continuer dans le sens horaire et se retrouver en face du connecteur avant (**figure 4c**). Encore une fois, ils vont induire plus de charges sur les segments jaunes reliés par le connecteur avant.



Fonctionnement de la machine de Wimshurst

Ce mécanisme ingénieux permet d'augmenter très rapidement la quantité de charges induites, ce qui permet à la machine de s'amorcer d'elle-même, par le simple frottement des balais.

Pour en savoir plus

- *Le monde physique: Le magnétisme et l'électricité*, Amédée GUILLEMIN, Librairie Hachette et Cie, Paris, 1883.
- *Traité d'électricité statique*, M. E. MASCART, G. Masson, Paris, 1876.
- *Homemade Lightning*, R. A. FORD, Tab Books, New York, 1996.
- *Electrostatic Machines*, Antonio Carlos M. DE QUEIROS, excellent site Internet avec beaucoup d'information sur l'histoire, la théorie et la fabrication de différents types de machines: www.coe.ufrj.br/~acmq/electrostatic.html

De 1788 à 1920

Un peu d'histoire

Comme nous venons de le voir dans les **deux derniers épisodes**, plusieurs types de machines électrostatiques ont vu le jour. Il était important, pour les fabricants d'instruments, de pouvoir les comparer.

Longueur d'étincelle et nombre de tours

Deux critères se sont imposés tout naturellement : premièrement, la longueur des étincelles électriques qu'une machine pouvait produire, et, deuxièmement, le nombre de tours que la machine devait effectuer pour produire l'étincelle. On voulait évidemment une machine qui puisse fournir une très longue étincelle en peu de tours.

Pour obtenir une étincelle plus longue, avec une machine donnée, il fallait éloigner les boules de l'**éclateur** et la faire tourner plus longtemps, pour accumuler plus d'électricité sur les boules (**figure 1**).

La tension électrique

Or, plus on accumule d'électricité sur un objet, plus ça devient difficile de le faire. En effet, les charges qu'on veut y déposer sont repoussées par les charges de même signe qui s'y trouvent déjà. Et plus il y en a, plus la force de répulsion est grande.

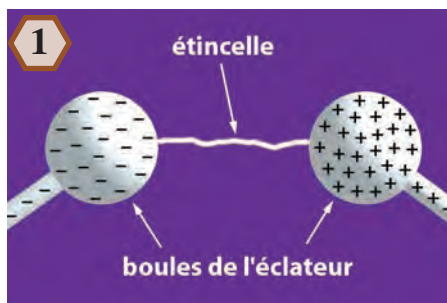
En 1788, **Volta** décrivait cette force de répulsion par un **état de tension** de l'électricité sur l'objet métallique. Selon lui, plus la quantité d'électricité accumulée est grande, plus la tension de l'électricité est élevée. Ainsi, pour produire de longues étincelles, avec une machine électrostatique, il faut que la machine puisse générer une **haute tension** afin d'accumuler beaucoup d'électricité sur les boules de l'éclateur de la machine.

Toujours selon **Volta**, cette tension est mise en évidence à l'aide d'un électromètre (**épisode 2-14**) fixé sur l'objet qu'on charge.

Une analogie

On peut faire une analogie avec un ballon extensible que l'on gonfle. Pour faire pénétrer de plus en plus d'air dans le ballon, il faut exercer une pression de plus en plus grande. Selon cette analogie, la pression de l'air dans le ballon correspond à la tension électrique des charges accumulées sur un objet conducteur. Ainsi, pour déposer de plus en plus d'électricité sur un objet conducteur, il faut appliquer une tension de plus en plus grande.

Par ailleurs, lorsque la pression de l'air monte trop dans le ballon, il éclate et l'air s'en échappe. De même, lorsque la tension monte trop sur l'éclateur d'une machine électrostatique, une décharge se produit et l'électricité s'écoule sous forme d'une étincelle (éclair miniature).



Étincelle électrique entre les boules de l'éclateur d'une machine électrostatique.

Beaucoup de volts

Au 19^e siècle, les scientifiques vont préciser cette notion de tension électrique. La tension d'un objet sera définie comme l'**énergie** qu'il faut dépenser pour apporter une unité de charge électrique sur cet objet, à partir d'une position très éloignée. On a donné le nom de volt à l'unité de tension, en l'honneur du célèbre savant italien **Volta**.

Dans les machines électrostatiques que nous avons étudiées (deux derniers épisodes), certaines peuvent produire des tensions de 100 000 volts ou plus. On parle alors de **haute tension** ou de **haut voltage**.

Est-ce dangereux ?

Les décharges électriques produites par une machine électrostatique de table ne constituent pas réellement de danger, même si la décharge peut être désagréable. Pour fixer davantage les idées, sache que l'électricité statique accumulée sur un peigne en plastique, frotté dans les cheveux, peut atteindre une tension de plusieurs milliers de volts et, pourtant, le peigne n'est pas dangereux.

Le danger n'est pas seulement une question de voltage, c'est surtout une question de quantité d'électricité. Les 110 volts ou les 220 volts de nos maisons sont plus dangereux, car l'électricité y circule en grande quantité et en permanence (pas seulement un court instant).

Mais **ATTENTION, n'essaie pas de charger une bouteille de Leyde ou un condensateur avec une machine électrostatique**, car là, la quantité d'électricité accumulée pourrait devenir dangereuse.

Les étincelles électriques

Nous avons vu que la haute tension peut produire des décharges ou étincelles électriques. Mais que sont réellement ces étincelles ?

Au début du 20^e siècle on a démontré que les atomes étaient constitués de particules d'électricité de signes contraires, les **protons** et les **électrons**. Normalement, les électrons et les protons sont en nombre égal et l'atome n'apparaît pas chargé d'électricité. L'air agit alors comme un isolant électrique.

Lorsqu'une machine produit une forte tension électrique, des électrons sont arrachés des atomes d'air, et celui-ci devient conducteur d'électricité. Les charges électriques circulent alors, dans l'air, entre les boules de l'éclateur de la machine. C'est la collision de ces charges avec les atomes d'air qui rend leur trajet lumineux, produisant ainsi l'étincelle.

Épisode 2-19 NIVEAU 3 UN « MONTE-CHARGE » ÉLECTRIQUE PRODUIT DES MILLIONS DE VOLTS

De 1929 à aujourd'hui

Un peu d'histoire

En 1919, une découverte effectuée par **Rutherford** a particulièrement enflammé l'imagination des scientifiques de l'époque. Ce grand savant a démontré qu'on pouvait transformer des atomes d'azote en atomes d'oxygène, en les bombardant avec des particules alpha, émises par les substances radioactives ! Le vieux rêve des alchimistes devenait donc une réalité.

Mais les particules alpha ne pouvaient provoquer la transmutation d'atomes plus lourds, comme le plomb. Pour cela, il fallait bombarder ces atomes avec des projectiles plus énergiques. Il vint alors à l'esprit des savants d'utiliser, comme projectiles, des ions (atomes électrisés) que l'on accélérerait jusqu'à de très grandes vitesses, à l'aide des forces électriques. Le défi consistait donc à trouver une façon d'accumuler une très grande quantité d'électricité sur un conducteur isolé, afin de produire les forces électriques requises.

Générer des millions de volts

C'est là qu'intervient le physicien américain **Robert J. Van de Graaff**. Après avoir étudié la physique en Europe, de 1924 à 1928, il revient aux États-Unis et élabore son projet de construire une machine capable d'atteindre les millions de volts nécessaires.

La machine de **Van de Graaff** est illustrée sur la **figure 1**. Comme nous l'avons vu à l'**épisode précédent**, pour atteindre de très hautes tensions électriques sur un conducteur, il faut y accumuler suffisamment de charges électriques. Nous avons vu également qu'il devient de plus en plus difficile de les accumuler, à cause de la force de répulsion qui augmente avec la tension. L'astuce imaginée par **Van de Graaff** consiste à aller déposer les charges électriques à l'intérieur d'une sphère métallique creuse isolée.

C'est évidemment l'expérience du cylindre de **Faraday** (**épisode 2-14**) qui l'a inspiré. On sait, en effet, que l'électricité accumulée sur un objet métallique creux n'exerce aucune force à l'intérieur de cet objet (**épisode 2-10**). De plus, toutes les charges électriques qu'on met en contact avec l'intérieur d'un objet métallique creux se retrouvent sur la surface extérieure de l'objet (**épisode 2-14**).

Le mécanisme imaginé par Van de Graaff pour aller porter l'électricité à l'intérieur de la sphère métallique est une courroie isolante mise en mouvement, entre deux rouleaux **R**, à l'aide d'un moteur **M** (voir la **figure 1**). Cette courroie passe à l'intérieur d'une colonne creuse qui sert de support isolant à la sphère métallique.

Les charges électriques sont produites par une source de tension auxiliaire **T**, d'une dizaine de milliers de volts, dont l'une des bornes est un peigne de pointes métalliques, faisant face à la courroie, et l'autre borne, le rouleau métallique inférieur, en face du peigne, de l'autre côté de la courroie. Comme nous l'avons vu à l'épisode 2-12, la densité des charges électriques qui s'accumulent sur une pointe est considérable. Il en résulte une ionisation de l'air autour de la pointe (appelé l'« **effet corona** ») et un « vent électrisé » (**figure 2**) qui est repoussé par les pointes, en direction du rouleau métallique inférieur, sans qu'il y ait d'étincelle. Les ions rencontrent la courroie isolante, s'y collent et sont



Fonctionnement de la machine de Van de Graaff

entraînés à l'intérieur de la sphère, où ils sont collectés par un autre peigne métallique fixé à la sphère.

La source de tension auxiliaire utilisée par **Van de Graaff** était un transformateur, alimenté par du courant alternatif avec une sortie redressée par des lampes électroniques. L'étude de ces technologies ne fait pas l'objet du présent volume, mais sera abordée dans un autre volume de cette série.

Pour ce qui est de la collecte des charges électriques sur la courroie, lorsque ces charges arrivent en face du peigne de pointes métalliques, à l'intérieur de la sphère, elles induisent des charges contraires sur les pointes. Ces dernières vont donc produire un « vent électrisé » (**figures 2 et 3**) qui va décharger la courroie, laissant la sphère métallique se charger d'une électricité du même signe que les charges sur la courroie, par induction électrostatique (**épisode 2-6**).

Van de Graaff construit un premier prototype en 1929, alors qu'il est chercheur à l'université de Princeton aux États-Unis. Cet appareil rudimentaire lui permet d'atteindre 80 000 volts. Deux ans plus tard, il construit un prototype atteignant 1,5 million de volts !

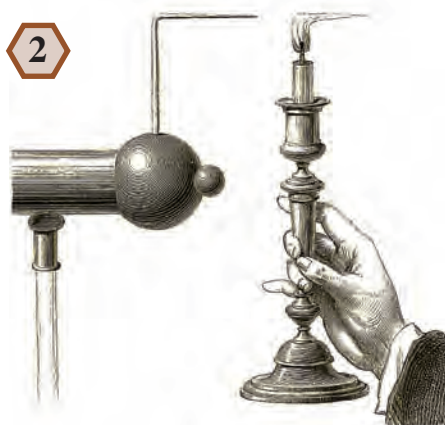
Ce savant américain se joint ensuite au MIT (Massachusetts Institute of Technology) où on inaugure, en 1933, deux machines de **Van de Graaff** de 14 mètres de haut avec des sphères métalliques de 4,6 mètres de diamètre. Une des machines accumule des charges positives sur sa sphère, alors que l'autre machine accumule des charges négatives. On atteint ainsi **une tension de cinq à sept millions de volts** entre les deux sphères métalliques !

Science pure et appliquée

Ces machines seront utilisées pendant plusieurs années pour la recherche sur les atomes et les rayons X, jusqu'à l'apparition d'accélérateurs de particules plus performants, comme les cyclotrons et les synchrotrons. Le MIT les donnera alors, au début des années 1950, au **Museum of Science de Boston** où on peut les voir fonctionner quotidiennement, depuis 1980, lors de démonstrations spectaculaires (**figure 4**).

Petites machines de table

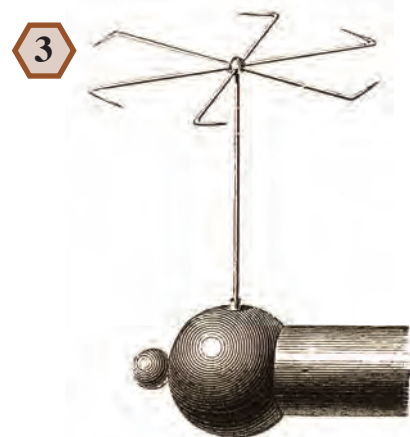
De nos jours, des petites machines **Van de Graaff** de table sont vendues pour les démonstrations dans les écoles. Ces petites machines peuvent générer une tension de quelques centaines de



Mise en évidence d'un « vent électrisé » au bout d'une pointe métallique fixée à une machine électrostatique.

milliers de volts, et n'ont pas de source de tension auxiliaire pour charger la courroie.

On utilise plutôt un rouleau inférieur en plastique et une courroie en caoutchouc. Le contact intime de ces deux matériaux, qui s'établit et se rompt en permanence, charge le rouleau positivement et la courroie négativement. Mais la charge du rouleau



Un tourniquet de pointes métalliques recourbées, en équilibre sur une tige pointue, tourne sous l'influence du « vent électrisé ».

inférieur apparaît beaucoup plus concentrée que sur la courroie, dont la surface est beaucoup plus grande que celle du rouleau.

En connectant le peigne métallique inférieur à la terre, il en résulte que l'électricité sur le rouleau inférieur attire un vent électrisé, par induction, ce qui charge la courroie.



Démonstration d'éclairs artificiels produits par la machine de Van de Graaff, au Theater of Electricity du Museum of Science, à Boston. Une cage de Faraday protège l'animateur. La machine et la cage de l'animateur sont entourées par une gigantesque cage de Faraday faite de câbles métalliques, afin de protéger les spectateurs (gracieuseté du Museum of Science).

Pour en savoir plus

- *Homemade Lightning*, R. A. FORD, Tab Books, New York, 1996.
- *Van de Graaff Electrostatic Generator*, Bill BEATY: www.eskimo.com/~billb/emotor/vdg.html. (Site Internet contenant une profusion d'informations sur la théorie et la fabrication de machines Van de Graaff ainsi que sur leur utilisation pour diverses expériences d'électrostatique.)
- *The Development of Electrostatic Accelerators*, D. Allan BROMLEY, dans la revue *Nuclear Instruments and Methods*, Vol. 122, novembre/décembre 1974, p. 1 à 34, North-Holland Publishing Co.

1931 – aujourd'hui

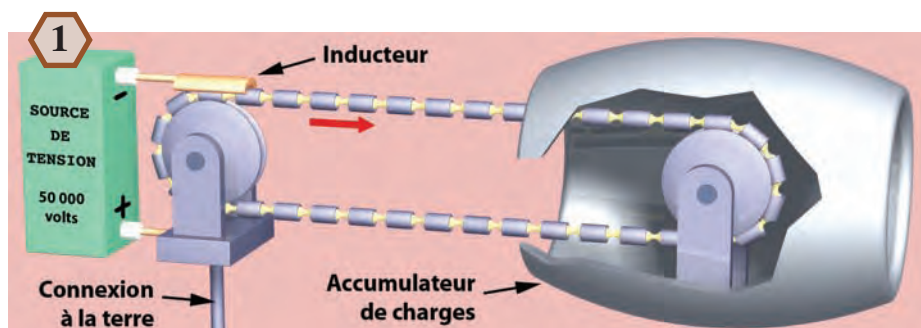
Un peu d'histoire

Un expérimentateur américain talentueux du nom de **Ray Herb** a consacré 65 années au développement des accélérateurs électrostatiques et de leurs applications. Ses efforts, commencés en 1931 à l'Université du Wisconsin, et les efforts de ses collaborateurs ont conduit à la commercialisation des accélérateurs **Pelletron™** à la fin des années 1960, par la compagnie **National Electrostatics Corporation**, fondée en 1965 par **Herb** et ses associés. Ces accélérateurs ont pris la relève des accélérateurs **Van de Graaff** (épisode précédent).

Plusieurs améliorations

Le premier problème auquel s'attaque **Herb** est de réduire les dimensions des accélérateurs **Van de Graaff**. Il y parvient dès 1933 en enfermant l'accélérateur dans un caisson rempli d'air sous pression dont la résistance électrique est plus élevée. Il essaiera ensuite d'autres gaz pressurisés ayant une résistance électrique plus élevée que l'air.

Lui et son équipe améliorent également les matériaux du tube à vide dans lequel sont accélérés les ions, de même que les sources et les détecteurs d'ions.



Représentation schématique simplifiée du chargement d'un accélérateur Pelletron (voir le site www.pelletron.com pour une description complète). Les petits cylindres métalliques de la chaîne sont chargés par induction électrostatique, à la manière du plateau d'un électrophore (épisode 2-7). L'inducteur, qui ne touche pas aux cylindres, joue le rôle du gâteau de résine. La poulie métallique en face de l'inducteur effectue la mise à la terre en touchant aux cylindres (ce que faisait ton doigt pour l'électrophore). En quittant la poulie, les cylindres, isolés par les pièces de plastique jaunes, vont se décharger à l'intérieur de l'accumulateur de charges.

Des applications impressionnantes

On retrouve les accélérateurs **Pelletron™** dans des systèmes perfectionnés capables d'analyser des quantités infimes d'atomes. Ces systèmes (figure 2) ont été utilisés, entre autres, pour la datation des manuscrits de la mer Morte. Ils sont également utilisés pour mesurer d'infimes concentrations de polluants dans notre corps, ou pour analyser les bulles d'air emprisonnées dans les carottes de glace de l'Antarctique, afin de connaître la composition de l'atmosphère dans le passé.



Un accélérateur Pelletron de la compagnie National Electrostatics Corporation produisant trois millions de volts et faisant partie d'un système d'analyse perfectionné des atomes. L'accélérateur est à l'intérieur du caisson bleu (gracieuseté de National Electrostatics Corporation).

Pour en savoir plus

- Pelletron Accelerators, NATIONAL ELECTROSTATICS CORP.: www.pelletron.com/index.html.
- The Development of Electrostatic Accelerators, D. Allan BROMLEY, dans la revue *Nuclear Instruments and Methods*, Vol. 122, novembre/décembre 1974, North-Holland Publishing Co., p. 1 à 34.
- A Retrospective of the Career of Ray Herb, G. A. NORTON et al., compte-rendu de la 8^e conférence internationale Heavy Ion Accelerator Technology, The American Institute of Physics, 1999, p. 3 à 23.

De 1885 à aujourd'hui

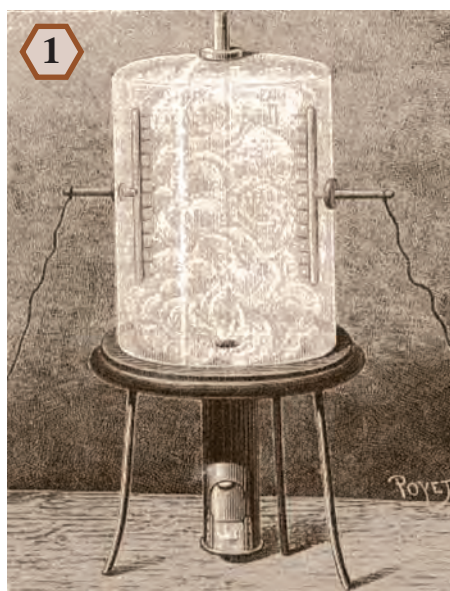
Un peu d'histoire

À la fin du 19^e siècle, l'air de plusieurs grandes villes était rempli de résidus, de suie et de cendres en provenance des cheminées d'usines. Les usines de transformation des minerais, les cimenteries, les usines de produits chimiques et les centrales électriques au charbon étaient particulièrement polluantes. Plusieurs scientifiques cherchaient des façons de réduire cette pollution néfaste.

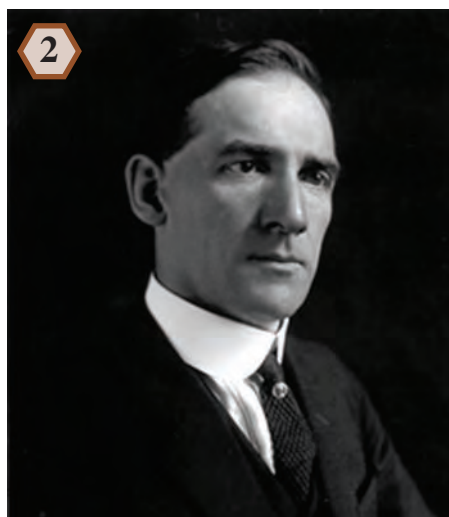
La découverte de Oliver Lodge

En 1885, le physicien anglais **Oliver Lodge** fait une découverte très intéressante à cet égard. Il remplit une cloche de verre de fumée et il dispose deux peignes de pointes métalliques à l'intérieur (**figure 1**). Lorsqu'il branche ces peignes aux bornes d'une machine électrostatique, la fumée se dissipe et les fines particules qui la composent sont précipitées sur les parois et le fond de l'enceinte.

Comme nous l'avons vu à l'**épisode 2-9**, les pointes métalliques électrisent les molécules d'air qui les entourent. On dit que l'air est **ionisé**.



Expérience de Oliver Lodge (Conservatoire national des arts et métiers, Conservatoire numérique <http://cnum.cnam.fr>).



Frederick Gardner Cottrell (1877-1948)
(gracieuseté de Research Corporation)

Ces molécules d'air ionisées se collent aux particules de fumée, lesquelles sont alors attirées par les parois de l'enceinte.

De nouvelles sources de tension

Mais les machines électrostatiques de l'époque n'étaient pas suffisamment puissantes pour des applications industrielles. Il fallait une nouvelle technologie, celle des **génératrices** à courant alternatif couplées à des **transformateurs** à haut voltage et à des **redresseurs**, pour que le courant électrique produit au bout du compte soit toujours dans le même sens (nous verrons ces technologies dans le volume 3).

Or, ce n'est que dans les premières années du 20^e siècle que des redresseurs industriels mécaniques suffisamment performants vont devenir disponibles.

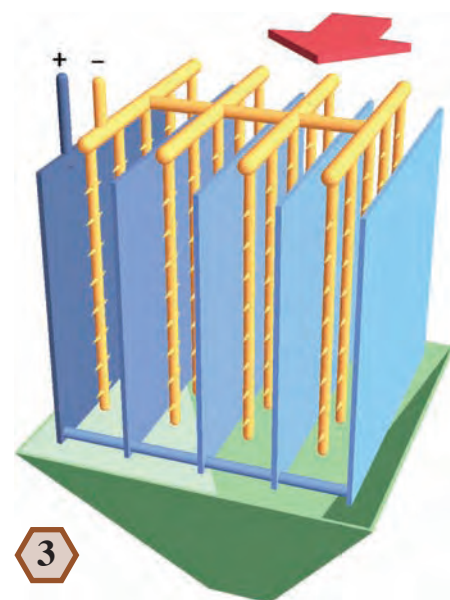
Précipitateurs électrostatiques

C'est à ce moment qu'entre en jeu le chercheur américain **Frederick Gardner Cottrell** (**figure 2**). Alors qu'il est professeur de chimie et de physique à l'université de Californie à Berkeley, il conçoit, en 1906, le premier **précipitateur électrostatique** réellement fonctionnel, en utilisant la technologie **génératrice-transformateur-redresseur** pour produire le haut voltage nécessaire.

Le principe de fonctionnement est illustré sur la **figure 3**. Une série de tiges métalliques munies de pointes et reliées sont disposées en rangées entre des plaques métalliques parallèles reliées entre elles. On applique la borne négative de la source de haute tension aux tiges et la borne positive aux plaques. La flèche rouge indique la direction d'écoulement de la fumée ou des vapeurs qui sortent de l'usine.

Les molécules d'air ionisées par les pointes portent une charge négative et s'attachent aux particules ou gouttelettes en suspension. Ces dernières sont alors attirées par les plaques positives et vont y adhérer.

Si l'air transporte des gouttelettes, elles vont s'écouler naturellement vers le bas et se retrouver dans l'**entonnoir de récupération** (en vert). S'il s'agit de particules de poussière ou de suie, elles vont s'accumuler sur les plaques. Pour les déloger, on fait vibrer les plaques à intervalles réguliers, ou encore un mécanisme les racle. Les particules tombent alors dans l'entonnoir, que l'on vide lorsqu'il est plein.



Principe de fonctionnement d'un précipitateur électrostatique industriel.

La tension utilisée est généralement de 50 000 à 80 000 volts (**épisode 2-18**) et les plaques métalliques sont mises en contact avec la terre, ce qui réduit les dangers d'électrocution.

L'industrie « précipitée »

Dès 1907, **Cottrell** et ses associés fondent la compagnie **Western Precipitation** pour commercialiser cette invention. Le premier précipitateur d'envergure fut installé dans une cimenterie de Californie, en 1911. En 1923, une centrale électrique au charbon de la **Detroit Edison Company** est la première à être équipée d'un tel système antipollution. Aujourd'hui, les précipitateurs électrostatiques constituent un équipement standard des usines de transformation et des centrales au charbon (**figure 4**). Ils enlèvent de 95 % à 99 % des résidus solides, qui autrement se retrouveraient dans l'atmosphère.

Chaque année, la quantité de cendres et de suie précipitée dans les centrales électriques au charbon des États-Unis peut remplir les wagons d'un train de 10 000 km de longueur !* Toutes ces cendres ne se retrouvent pas dans l'air, mais elles suscitent toutefois des inquiétudes quant à la pollution de l'eau dans les endroits où on en dispose.

Par ailleurs, les précipitateurs ne règlent pas tous les problèmes de pollution de l'air. Les oxydes d'azote, les oxydes de soufre et le CO₂ ne sont pas éliminés par de tels systèmes. La filière des centrales au charbon continue donc d'être néfaste pour l'environnement et le réchauffement climatique.

Un philanthrope des sciences

Outre son invention, ce qui a valu une place d'honneur à **Cottrell** dans l'histoire, c'est son altruisme. Rares sont les êtres de sa trempe. En 1912, il met sur pied une fondation appelée **Research Corporation** dans laquelle il verse une grosse partie des profits qu'il tire de son invention, dans le but d'aider les scientifiques qui ont besoin d'argent afin de poursuivre leurs recherches



Précipitateur électrostatique moderne d'une centrale thermique au charbon de 320 mégawatts. Après avoir transité dans le précipitateur, les gaz sont dirigés dans la cheminée. On voit bien les entonnoirs de récupération au bas de l'installation (gracieuseté de Wheelabrator Air Pollution Control inc., Pittsburgh, PA, USA).

pour le mieux-être de l'humanité. Cette fondation existe encore aujourd'hui (www.rescorp.org).

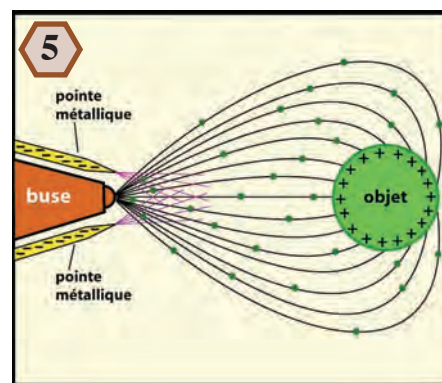
Parmi les premiers récipiendaires des subventions, on compte **Robert J. Van de Graaff (épisode 2-19)**, **Ernest O. Lawrence**, l'inventeur du cyclotron, et **R. H. Goddard**, le pionnier des fusées. À ce jour, trente lauréats du prix Nobel ont profité des subventions de la fondation pour démarrer leur carrière de recherche.

La peinture électrostatique

Un autre domaine qui bénéficie des avantages de l'électricité statique est celui de la peinture électrostatique, qui a fait son apparition dans les années 1950.

Des pointes métalliques près de la buse du pistolet à peinture sont reliées à la borne négative d'une source de haute tension alors qu'on branche l'objet métallique à peindre à la borne positive. Les molécules d'air sont ionisées négativement par les pointes et se

collent aux gouttelettes de peinture, les chargeant ainsi d'électricité négative. Les gouttelettes sont alors attirées par l'objet positif (**figure 5**). Avec ce procédé, on utilise environ la moitié de la peinture qu'on utiliserait normalement.



Avec la peinture électrostatique, les gouttelettes électrisées peuvent se déposer sur l'objet du côté opposé au pistolet, ce qui diminue beaucoup les pertes.

* *Electricity, Today's Technologies, Tomorrow's alternatives*, ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI), distribué par William Kaufmann Inc., Palo Alto, Californie, 1982, p. 81.

Pour en savoir plus

- *Electrostatics*, A. D. MOORE, Laplacian Press, Morgan Hill, California, 1997.
- Site Internet de la *Research Corporation* : www.rescorp.org (divers fournisseurs de précipitateurs électrostatiques).

De 1937 à aujourd'hui

Un peu d'histoire

Il est difficile d'imaginer un monde sans photocopies. Et pourtant, les photocopieuses actuelles n'existent que depuis 1960, grâce à un homme exceptionnel, **Chester Carlson**, et deux compagnies entrepreneuriales, **Battelle** et **Xerox**, qui ont cru en son idée révolutionnaire, basée sur l'électricité statique.

Papiers carbone et photographies

Carlson étudie d'abord la physique au **California Institute of Technology** et ensuite le droit à la **New York Law School**. Au début de sa carrière, dans les années 1930, il travaille comme agent de brevets pour une compagnie de New York, où son travail lui impose de faire de nombreuses copies de documents.

À l'époque, pour avoir une copie d'un document, il fallait le taper à la machine à écrire avec des **papiers carbone** entre les feuilles de papier ordinaire. Si le document existait déjà, il fallait en faire une reproduction photographique, ce qui coûtait cher et prenait du temps.

Carlson entrevoit alors l'énorme potentiel d'un système de reprographie qui pourrait produire une copie en moins d'une minute, à un prix raisonnable.

La photoconductivité

Étant lui-même un physicien, il étudie la question dans ses temps libres. Il écarte la photographie, car, se dit-il, les grosses compagnies comme **Kodak** ont



Chester Carlson (1906-1968)
(gracieuseté de Xerox)

dû regarder cette approche sous tous ses aspects. Aussi, il passe en revue les autres phénomènes physiques où la lumière interagit avec la matière.

La photoconductivité, découverte en 1873 par **May** et **Smith**, retient son attention. Dans ce phénomène, certains matériaux qui sont des isolants électriques, à la noirceur, conduisent l'électricité lorsqu'on les éclaire. Le soufre étant un matériau faiblement photoconducteur, mais facile à trouver et moins toxique que d'autres, **Carlson** décide de l'utiliser pour ses premières expériences.

La première xérographie

Son idée est de fabriquer des plaques métalliques recouvertes d'une mince couche de soufre qu'il fait fondre avant de l'étendre.

Il expérimente d'abord dans sa cuisine, en 1937. En 1938, il loue une pièce au-dessus d'un bar et engage un assistant, **Otto Kornei**. Le 22 octobre 1938, ça fonctionne !

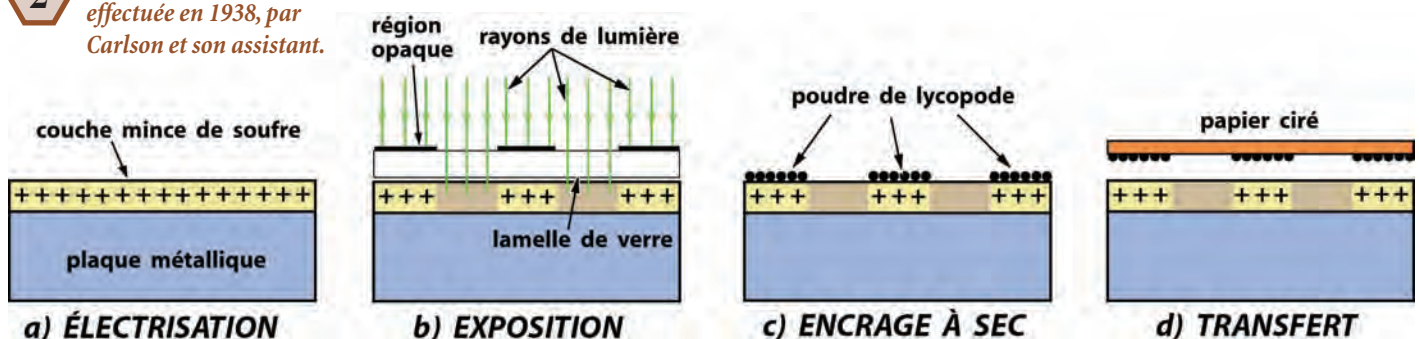
Voici comment ils procèdent. Tout d'abord, en se plaçant dans la noirceur, ils électrisent positivement la couche de soufre en la frottant avec un mouchoir (**figure 2a**).

Ils déposent ensuite sur la plaque électrisée une lamelle de verre, sur laquelle un texte a été écrit à l'encre, ce qui produit des régions opaques à la lumière (**figure 2b**). Ils illuminent alors l'ensemble avec une lumière intense pendant plusieurs secondes. Les endroits où la lumière a atteint la couche de soufre deviennent conducteurs, et les charges positives qui s'y trouvent peuvent ainsi être neutralisées par les charges négatives de la plaque métallique. Car celles-ci sont désormais libres de circuler dans la couche de soufre, à ces endroits.

Dans un troisième temps, ils saupoudrent une poudre de lycopode (spores de la plante appelée lycopode), qui a la propriété d'être très fine et de ne pas former de grumeaux. Cette poudre est attirée par les charges positives à la surface de la couche de soufre, et, en soufflant délicatement sur la plaque, seules les spores qui sont au-dessus des régions électrisées restent en place (**figure 2c**).

Ils transfèrent enfin la poudre sur un papier ciré (**figure 2d**), en exerçant une pression entre le papier et la plaque, et en chauffant de manière à faire fondre la cire.

2 Expérience originale, effectuée en 1938, par Carlson et son assistant.



Ils obtiennent ainsi la première «**électrophotographie**» (**figure 3**), que l'on appellera plus tard **xérographie** (des racines grecques *xeros* (*sec*) et *graphein* (*écriture*). C'est en fait une technique particulière de photocopie, comme l'est également la photographie de documents. Mais puisque la xérographie va rapidement dominer le marché de la photocopie, c'est cette appellation (photocopie) qu'on a retenue.

Battelle et Xerox

Passer d'une idée géniale à un produit commercial n'est pas toujours évident. Après avoir pris un brevet, de 1939 à 1944, **Carlson** essaie de vendre son idée à plus de vingt compagnies importantes, qui l'ont toutes refusée. La chance lui sourit, toutefois, lorsque la **Battelle Memorial Institute**, une organisation de recherche à but non lucratif, accepte de poursuivre le développement de son invention.

Les chercheurs de **Battelle** introduisent plusieurs innovations. Ils font tout d'abord un progrès important en remplaçant le soufre par du sélénium, qui offre de bien meilleures propriétés photoconductrices. Ils réalisent un autre bond en avant en améliorant la poudre d'encre à sec, qui devient une résine pigmentée qu'on peut fusionner à du papier ordinaire en la chauffant. Pour électriser la couche de sélénium, ils utilisent un mince fil métallique porté à un haut voltage, ce qui ionise l'air autour du fil, à la manière d'une pointe métallique (**épisode 2-9**). Ce

phénomène d'ionisation, qu'on appelle l'**effet corona**, ils l'utilisent également pour électriser la feuille de papier, afin qu'elle attire la poudre d'encre à sec lors du transfert à partir de la couche de sélénium.

Bref, les chercheurs de **Battelle**, conjointement avec **Carlson**, qui agit comme consultant, développent les principaux composants d'un photocopieur moderne.

En 1947, une alliance s'établit avec la compagnie **Haloid** de Rochester, grâce à l'esprit visionnaire de son président de l'époque, **Joseph C. Wilson**. **Haloid** continuera le développement et fabriquera les photocopieuses. Cette petite compagnie, qui fabriquait du papier pour la photographie, deviendra, en 1961, **Xerox Corporation**, une multinationale d'envergure.

Des tonnes de photocopies

Tous ces efforts vont être récompensés, en 1960, lorsqu'une photocopieuse tout automatique, la **Xerox modèle 914** (**figure 4**), est introduite sur le marché. On y retrouve un système de miroirs et de lentilles qui produit l'image du document sur un tambour photoconducteur.

Le succès est immédiat et les ventes grimpent en flèche. En moins de deux ans, 10 000 unités sont livrées. Les clients font, dès le début, de 3 000 à 4 000 copies par jour.

On peut dire que la xérographie a apporté une révolution aussi importante dans le monde des communications que l'invention de l'imprimerie.

Un homme généreux

Ce succès commercial fait de **Chester Carlson** un homme très riche, lui qui avait vécu pauvrement dans sa jeunesse et très modestement à l'âge adulte. On estime que de 1960 à 1968, l'année de sa mort, il a retiré, pour son invention, près de 200 millions de dollars.

De ce montant, il en donne plus des deux tiers à des œuvres de charité, à des hôpitaux, à des écoles, très souvent de façon anonyme!

Les imprimantes laser

L'invention de **Carlson** va générer une autre révolution, dans les années 1970, avec l'imprimante laser pour les ordinateurs. Ce sont les chercheurs de **Xerox** et de **IBM** qui la mettent au point.

Le principe de fonctionnement est toujours la **xérographie**, mais, cette fois, c'est un laser qui génère l'image sur la surface photoconductrice. L'ordinateur fait varier rapidement l'intensité du laser pendant que le faisceau, focalisé en un très petit point, balaie la surface.

En utilisant trois poudres de couleurs différentes et trois expositions, on a ensuite introduit les imprimantes laser couleur (**figure 5**), dans les années 1990.



Première xérographie réalisée le 22 octobre 1938, par Carlson et son assistant (gracieuseté de Xerox).

La première photocopieuse automatique, modèle 914 de la compagnie Xerox, introduite sur le marché en 1960 (gracieuseté de Xerox).



Imprimante laser couleur moderne de la compagnie Xerox (gracieuseté de Xerox).

Pour en savoir plus

- *Chester Carlson and the development of Xerography*, Susan ZANNOS, Mitchell Lane Publishers, 2003.
- Sites Internet : howstuffworks (www.howstuffworks.com) ; Xerox (www.xerox.com) ; Battelle (www.battelle.org).

De 1987 à aujourd'hui

Un peu d'histoire

Les projecteurs de diapositives, les rétroprojecteurs et les projecteurs cinématographiques cèdent graduellement la place à de nouveaux projecteurs électro-optiques, utilisant entre autres des micromiroirs électrostatiques.

Nouveaux vs traditionnels

Les projecteurs traditionnels nécessitent de développer des pellicules photographiques ou de préparer des projecteurs électro-optiques ont un **modulateur spatial de lumière** qu'on peut modifier électroniquement plus de 60 fois par seconde, ce qui les rend très pratiques et polyvalents.

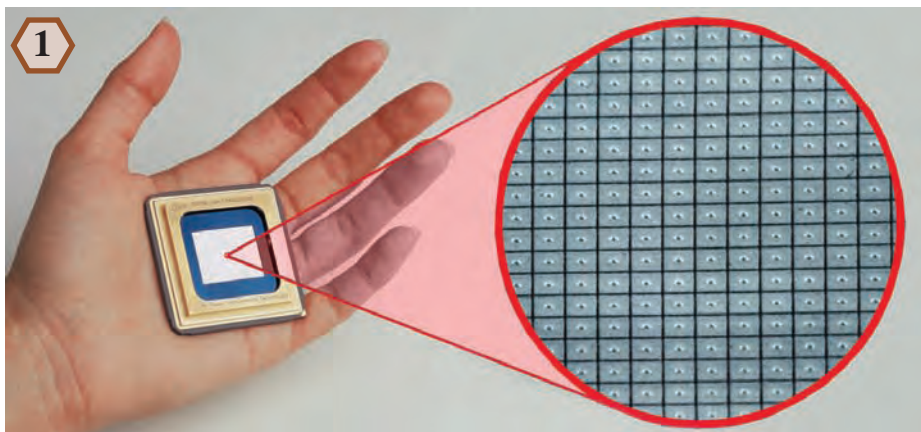
Les images que projettent ces nouveaux systèmes peuvent avoir diverses origines: un appareil photo numérique, une caméra vidéo numérique, un numériseur ou un ordinateur (logiciels de graphisme et de présentation). Les images sont mises en mémoire sur une cassette ou un disque magnétique, sur un disque optique, ou encore dans une puce électronique. Un lecteur approprié (magnétoscope, lecteur CD/DVD ou ordinateur) transmet ensuite l'information au projecteur.

On retrouve ces systèmes de projection électro-optiques dans certaines salles de classe, dans les nouveaux téléviseurs à grand écran, et dans un nombre grandissant de salles de cinéma numérique.

Cristaux liquides et micromiroirs

Présentement, deux technologies différentes existent sur le marché: les projecteurs à cristaux liquides et les projecteurs à micromiroirs. Ces derniers offrent plusieurs avantages et pourraient dominer le marché d'ici quelques années, lorsque les prix auront baissé.

C'est le Dr **Larry Hornbeck** de la compagnie **Texas Instruments**, qui a inventé, en 1987, les dispositifs



Le dispositif DMD de Texas Instruments comporte environ un million de micromiroirs, chacun étant cinq fois plus petit que l'épaisseur d'un cheveu. Ils sont actionnés par les forces d'attraction électrostatiques (gracieuseté de Texas Instruments).

à micromiroirs numériques. L'appellation originale anglaise est **Digital Micro-mirror Device** ou plus simplement **DMD**. La figure 1 montre un DMD, de même qu'un agrandissement de ses micromiroirs.

Une «diapo réfléchissante»

Pour comprendre le fonctionnement d'un DMD, imagine que ce dispositif agit comme une diapositive réfléchissante. En insérant le DMD dans un projecteur, ce dernier en fera l'image agrandie sur un écran, comme le ferait un projecteur de diapositives.

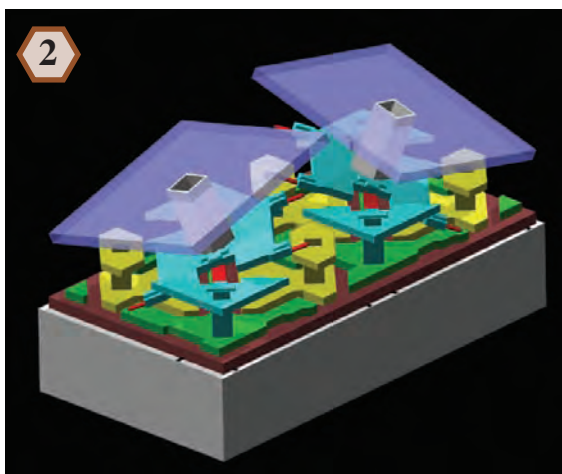
Considérons tout d'abord la formation d'une image en noir et blanc. Il suffit pour cela que chacun des micromiroirs, qui composent la surface active du

DMD, réfléchisse une lumière blanche en plus ou moins grande quantité, selon les variations lumineuses de l'image qu'on veut projeter.

En fait, chacun des micromiroirs constitue un point ou un **pixel** de l'image, et un DMD contient environ un million de micromiroirs. Chacun d'eux est un carré dont le côté est cinq fois plus petit que l'épaisseur d'un cheveu!

L'électrostatique à l'œuvre

Pour comprendre le mécanisme qui actionne les micromiroirs, réfère-toi à la figure 2. Les miroirs (en violet) peuvent basculer d'un côté ou de l'autre autour d'une charnière (en rouge) sous les miroirs et dans le sens de leurs diagonales.



Deux micromiroirs (gracieuseté de Texas Instruments).

On charge d'électricités contraires le miroir et une des deux structures jaunes sous chacun d'eux. L'attraction électrostatique fait alors pencher le miroir.

Les plaques bleues avec les quatre pointes rouges sont là pour empêcher les miroirs de rester collés après avoir été attirés. Ces pointes agissent comme un butoir lorsque le miroir bascule, et limitent le contact.

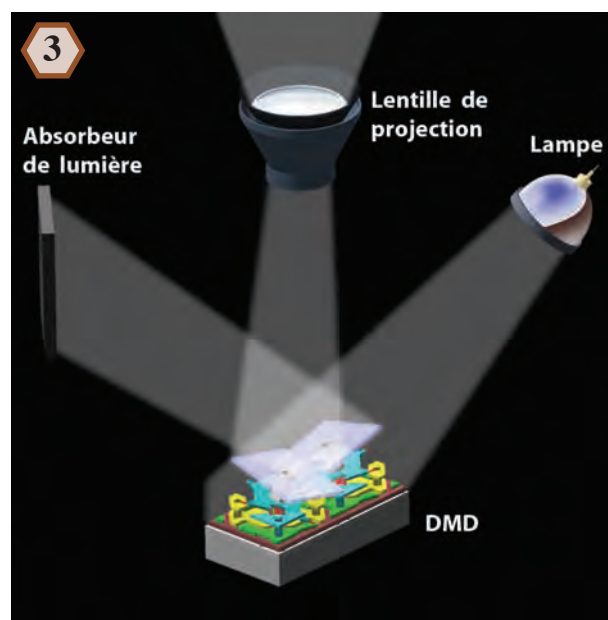
Les très petites distances entre les micromiroirs et

leurs structures sous-jacentes (en jaune) font que les forces d'attraction électrostatiques sont très fortes. Il suffit d'appliquer une tension de cinq volts pour faire basculer les miroirs dans un sens ou dans l'autre. En raison de leurs petites dimensions, ces micromiroirs peuvent basculer plusieurs milliers de fois par seconde, et fonctionner plus de 100 000 heures avant de subir des dommages.

Un projecteur en noir et blanc

La **figure 3** permet de comprendre le fonctionnement d'un projecteur en noir et blanc. On y voit deux micromiroirs dont l'un est dans la « position blanche » et réfléchit la lumière d'une lampe vers la lentille de projection, alors que l'autre micromiroir est dans la « position noire » et réfléchit la lumière sur un absorbeur. Ce sont les deux seules positions que peuvent prendre les miroirs.

Les miroirs qui envoient la lumière dans la lentille de projection produisent un point lumineux sur l'écran, alors que ceux qui envoient la lumière sur l'absorbeur produisent un point noir. Les différents tons de gris sont obtenus en variant le temps que passe un miroir dans la « position blanche » *versus* son temps dans la « position noire », pendant la durée allouée pour une image.



Principe de fonctionnement d'un projecteur à micromiroirs (DMD) en noir et blanc (gracieuseté de Texas Instruments, le texte a été traduit par l'auteur).

Un projecteur en couleurs

La théorie des couleurs nous enseigne qu'on peut reproduire une vaste gamme de couleurs à partir de trois **couleurs primaires lumière** : le rouge, le vert et le bleu. Il suffit d'en varier les proportions pour obtenir la couleur désirée.

Ainsi, en superposant une image rouge, une image verte et une image bleue, on obtient une image en couleurs. Pour ce faire, il suffit d'éclairer un DMD avec les trois couleurs primaires, l'une après l'autre, suffisamment rapidement pour que l'œil ne puisse distinguer les couleurs primaires individuellement.

Un système de projection en couleurs, basé sur ce principe, est illustré sur la **figure 4**. La lumière blanche de la lampe traverse alternativement trois filtres de couleur, disposés sur un disque qui tourne. Sa rotation est synchronisée avec les impulsions électriques envoyées aux micromiroirs, de manière à produire la bonne image au bon moment.

Pour obtenir des images encore plus lumineuses, on peut également employer trois DMD, un pour le rouge, un pour le vert et un pour le bleu.

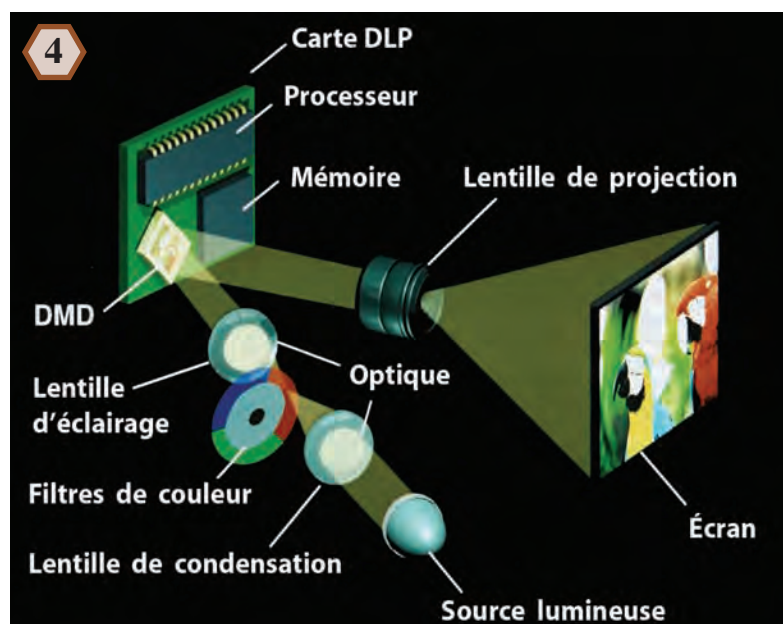
La technologie DLP™

Le traitement de la lumière avec un DMD nécessite de coordonner un ensemble de fonctions optiques, électroniques et mécaniques, ce que la compagnie **Texas Instruments** a appelé la technologie **DLP™** (pour Digital Light Processing).

C'est la seule technologie suffisamment lumineuse et robuste pour être implantée dans les salles de cinéma. De plus, la technologie DLP™ permet de projeter des images contenant jusqu'à huit fois plus de couleurs qu'avec un système de projection traditionnel utilisant des pellicules cinématographiques.

Bientôt, les bobines de pellicule cinématographique seront chose du passé. On pourra produire et distribuer des films sous forme numérique, à moindre coût.

Les DMD représentent une véritable prouesse technologique dans le monde de la microfabrication, et une application pour le moins « futuriste » de l'électrostatique.



Principe de fonctionnement d'un projecteur à micromiroirs (DMD) en couleurs (gracieuseté de Texas Instruments, le texte a été traduit par l'auteur).

Pour en savoir plus

– Site Internet de **Texas Instruments** sur la technologie DLP™ (www.dlp.com).

De 1950 à aujourd'hui

Un peu d'histoire

Le vol d'un avion ou d'un hélicoptère nécessite que l'on génère du vent, à l'aide d'une hélice ou d'un turboréacteur. Mais, on peut également produire du vent grâce à l'électricité, et faire léviter un dispositif, sans parties mobiles !

Un vent ionique

Nous avons vu, à l'épisode 2-9, qu'en chargeant d'électricité une aiguille métallique, la quantité d'électricité qu'on y retrouve, dans un volume donné, est d'autant plus grande qu'on s'approche de la pointe.

Cette grande densité d'électricité exerce des forces électriques considérables sur les molécules d'air en contact avec la pointe. Lorsqu'elle est chargée positivement, la pointe rend les molécules d'air positives. Lorsqu'elle est chargée négativement, elle les rend négatives. Dans les deux cas, on dit que les molécules d'air ont été **ionisées** et qu'elles sont devenues des **ions**.

Au moment précis où les molécules d'air acquièrent une charge électrique de même signe que la pointe, elles sont violemment repoussées par celle-ci. Il en résulte un **vent ionique**, que l'on détecte facilement à l'aide d'une chandelle (voir les figures 2 et 3 de l'épisode 2-19).

Le même phénomène peut être reproduit avec un fil métallique de très petit diamètre, en appliquant une tension électrique (épisode 2-18) suffisamment élevée. Le fil ionise les molécules d'air dans son voisinage et on obtient un « vent ionique cylindrique » que l'on appelle « **effet corona** ».

La propulsion électrocinétique

C'est le chercheur américain **Thomas Townsend Brown** qui a été le premier à démontrer la propulsion par vent ionique, ou **électrocinétique**, dans les années 1950.

Il utilise deux disques métalliques, attachés à un bras horizontal, et libres

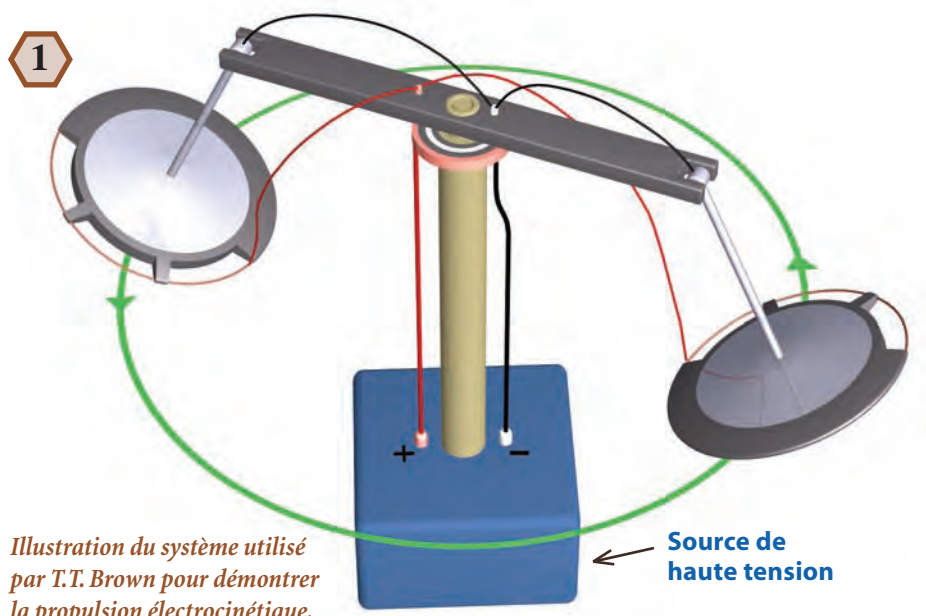
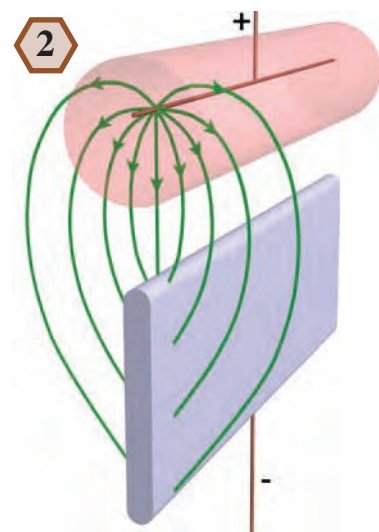


Illustration du système utilisé par T.T. Brown pour démontrer la propulsion électrocinétique.

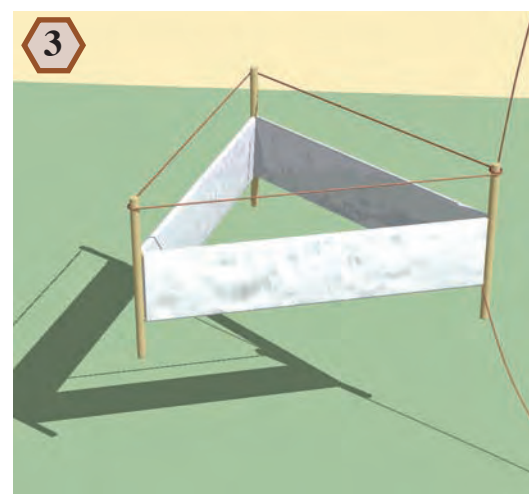
de tourner autour d'un mât central. La figure 1 nous montre son système, représenté de façon schématisée. Un fil métallique de petit diamètre est fixé parallèlement aux « bords avant » des disques, grâce à un anneau de plastique isolant ajouré (en gris). Ces **fils de tête** sont reliés à la borne positive d'une source de haute tension (en bleu). La borne négative de cette source est reliée aux disques métalliques. Afin de ne pas nuire à la rotation, **Brown** utilise des contacts glissants au sommet du mât central.

Dans ses expériences, il propulse des disques de 61 cm de diamètre à une vitesse de 20 km/heure, sur une trajectoire de 6 m de diamètre, en les alimentant avec une source de tension de 50 000 volts.

Le principe est illustré sur la figure 2. Une région ionisée (en rose) est générée près du fil. Les ions qu'elle contient sont propulsés sur des trajectoires indiquées par les lignes vertes, et entraînent les molécules ordinaires par collision, ce qui crée un vent vers le bas de la figure.



Principe de fonctionnement de la propulsion électrocinétique.



Première génération de « lifters », apparue en 2001, utilisant le principe de la propulsion électrocinétique. Le faible poids d'un « lifter » lui permet de léviter.

La plaque métallique du bas (en bleu) ou «**plaque de queue**» est attirée par le «nuage d'ions» (en rose), alors que le fil de tête est repoussé par ce nuage. Il en résulte une force qui tend à propulser l'ensemble vers le haut, sur la **figure 2**.

Lorsque les ions frappent la plaque de queue, on pourrait croire que l'impulsion vers le bas, qu'ils donnent alors à la plaque, annule la force vers le haut. Mais ce n'est pas le cas, car tout au long de leur trajectoire vers la plaque de queue, les ions transfèrent leur énergie aux molécules non ionisées de l'air, par collision. Ces molécules ordinaires, étant très peu attirées par la plaque, continuent leur chemin vers le bas sans frapper la plaque.

Dans un dispositif complet, le fil de tête et la plaque de queue étant reliés par une structure isolante, le déplacement se fait dans la direction du fil de tête.

Sur les **figures 1 et 2**, la borne positive de la source de haute tension est branchée au fil de tête, et la borne négative est reliée à la plaque ou au disque métallique. Mais la propulsion fonctionne également lorsqu'on inverse les branchements.

Pour ceux qui voudraient approfondir le sujet, notons qu'on associe souvent ce qu'on appelle l'effet **Biefeld-Brown** à la propulsion électrocinétique. Cet effet agirait sur les condensateurs en produisant une force dans la direction de leur plaque positive. Or, ce n'est pas le cas dans la propulsion électrocinétique, puisque la force demeure toujours dans la direction du fil de tête, peu importe la polarité qu'on lui associe (+ ou -).

Les «lifters»

Récemment, la propulsion électrocinétique a suscité beaucoup d'intérêt grâce à un dispositif d'un design très léger introduit en juin 2001 par **Jeff Cameron**, de la compagnie **Transdimensional Technologies**. Ce



Reconstitution du «lifter» de Transdimensional Technologies par Jean-Louis Naudin. Des fils de nylon fixés sur la table empêchent le «lifter» d'aller trop haut (gracieuseté de J.-L. Naudin).

dispositif, qui a été baptisé «**lifter**», est constitué d'une structure triangulaire en balsa (bois très léger) et de «plaques de queue» en papier d'aluminium (**figure 3**).

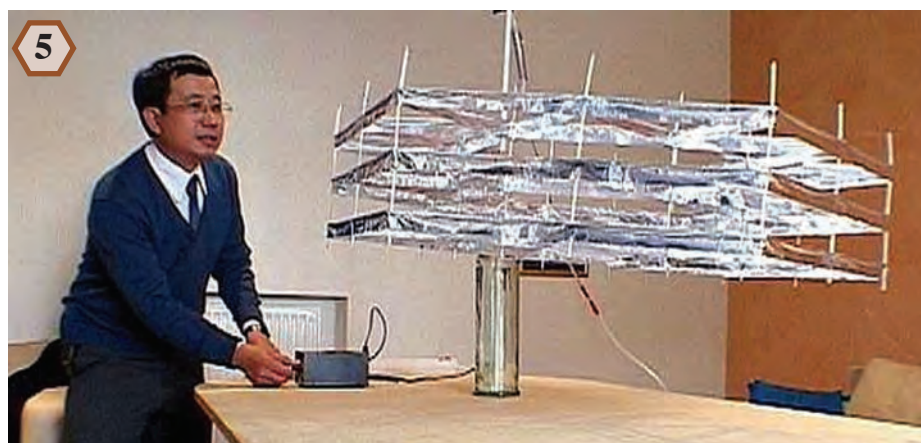
Ce qui rend les «lifters» très spectaculaires, c'est qu'en raison de leur faible poids, ils peuvent s'envoler! Ce n'est toutefois pas un vol autonome puisque la source de tension, trop lourde, doit rester au sol.

Jean-Louis Naudin

Si le phénomène des «lifters» est devenu si populaire, c'est dû, en grande partie, à **Jean-Louis Naudin** qui a abondamment publicisé cette technologie dans son site

Internet (www.jlnlabs.org). Il a d'abord reconstitué le «lifter» de **Transdimensional Technologies** (**figure 4**) et progressivement construit des «lifters» plus impressionnants (**figure 5**), tout en rendant disponibles, dans son site, les informations nécessaires pour en construire. Il y publicise même les reproductions faites par d'autres, qui se chiffraient à 313 en juin 2005!

MAIS ATTENTION, CAR LE HAUT VOLTAGE REQUIS EST DANGEREUX, ET SEULS DES ADULTES COMPÉTENTS PEUVENT LE MANIPULER DE FAÇON SÉCURITAIRE.



Jean-Louis Naudin fait voler un gros «lifter» à trois étages (gracieuseté de Jean-Louis Naudin).

Pour en savoir plus

- Appareils et procédés électrocinétiques, T.T. BROWN, brevet d'invention français n° fr1207519, 7 septembre 1959.
- Electrohydrodynamic fluid pump, T.T. BROWN, brevet américain n° us3267860, 23 août 1966.
- On peut télécharger gratuitement ces brevets sur le RÉSEAU ESPACENET (http://fr.espacenet.com/espacenet/fr/fr/e_net.htm). Il suffit d'entrer les numéros ci-dessus dans la case appropriée. Voir également les références B4, B5 et B6.
- Le projet lifter, Jean-Louis NAUDIN, site Internet de JLN Labs (www.jlnlabs.org).
- ElectroHydroDynamic (EHD) thrusters, Ingénieur SAVIOUR, site Internet de Blaze Labs (www.blazelabs.com).

RÉFÉRENCES

Livres anciens (antérieurs à 1960) ou leurs rééditions

- A1** AEPINUS, F.U.T., *Tentamen theoriae electricitatis et magnetismi*, Imprimerie de l'Académie des sciences, St-Petersbourg, 1759. Édition anglaise récente: *An Essay on the Theory of Electricity and Magnetism*, Princeton University Press, Princeton, 1979.
- A2** BAUER, Edmond, *L'électromagnétisme hier et aujourd'hui*, Albin Michel, Paris, 1949.
- A3** BECQUEREL, Antoine-César, BECQUEREL, Edmond, *Traité d'électricité et de magnétisme*, 3 volumes, Firmin-Didot, Paris, 1855-1856.
- A4** COULOMB, Charles A., *Collection de mémoires relatifs à la physique*, publiée par la Société française de physique, tome 1, Gauthier-Villars, Paris, 1884. Nouvelle édition: Librairie scientifique et technique Albert Blanchard, Paris, 2002.
- A5** DE MARICOURT, Pierre (dit Petrus Perigrinus), *Epistola Petri Perigrini de Maricourt ad Sygerem de Foucaucourt militem de Magnete*, 1269. Extraits en français dans la référence A-1, ci-dessus. Traduction anglaise: *The Letter of Petrus Perigrinus on the magnet, A.D. 1269*, par le frère Arnold, McGraw Publishing Company, New York, 1904. Édition plus récente comme un chapitre dans le livre *The Free-Energy Device Handbook, a compilation of patents & reports*, compilé par David Hatcher Childress, chez Adventures Unlimited Press, Stelle, Illinois, 1995.
- A6** DESCARTES, René (édition originale en latin), *Principia philosophiae*, Amstelodami, 1644. Édition latine ultérieure: chez Léopold Cerf, Paris, 1905. Édition française originale: *Les principes de la philosophie*, chez Henri Le Gras, Paris, 1647. Édition française plus récente dans: *Œuvres de Descartes*, tome 9, vol. 2, chez Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 1978.
- A7** DUFAY, Charles-François de Cisternay, *Quatrième mémoire sur l'électricité*, dans *Histoire de l'Académie royale des sciences (année 1733)*, pages 457 à 476, Imprimerie royale, Paris, 1735.
- A8** FARADAY, Michael, *Experimental Researches in Electricity*, Taylor & Francis, Londres, volume 1 en 1839, volume 2 en 1844, volume 3 en 1855. Nouvelle édition des trois volumes: chez Green Lion Press, Santa Fe, New Mexico, 2000.
- A9** FIGUIER, Louis, *Les Merveilles de la Science*, chez Furne Jouvett et Cie, volumes 1 et 2, 1868, volume 3, 1869, volume 4, 1870, 2 volumes de suppléments, 1889-1890.
- A10** FRANKLIN, Benjamin, *Œuvres de M. Franklin*, traduit de la quatrième édition anglaise de 1769 par M. Barbeau Dubourg, chez Quillau l'aîné et Esprit, Paris, 1773.
- A11** GANOT, A., *Traité élémentaire de physique expérimentale et appliquée et de météorologie*, chez l'Auteur-Éditeur, Paris, 1859.
- A12** GAUSS, Carl Friedrich, *Intensitas vis magneticae terrestres ad mensuram absolutam revocata*, édition originale en latin, Göttingen, 1841, également dans *Carl Friedrich Gauss Werke*, p. 11 à 118, Göttingen, 1877.
- A13** GILBERT, William, *De magnete, magneticisque corporibus*, Londres, 1600. Traduction anglaise: *On the Loadstone and Magnetic Bodies*, par P. FLEURY MOTTELEY, Edwards brothers Inc., Ann Arbor, Michigan, 1892. Édition anglaise chez Bernard Quaritch, London, 1893. Édition plus récente: Dover, New York, 1958.
- A14** GOODMAN, Nathan G., *The Ingenious Dr. Franklin; Selected scientific letters of Benjamin Franklin*, University of Pennsylvania Press, Philadelphia, 1931.
- A15** GUILLEMIN, Amédée, *Le monde physique: Le magnétisme et l'électricité*, Librairie Hachette et Cie, Paris, 1883.
- A16** LE BRETON, J., *Histoire et applications de l'électricité*, H. Oudin et Cie, Paris, 1884.
- A17** MAGIE, William Francis, *A Source Book in Physics*, McGraw-Hill, New York, 1935. On y trouve des extraits des écrits de plusieurs savants, dont ceux de Gilbert, Von Guericke, Gray, Du Fay, Franklin, Nollet, Aepinus, Coulomb et Faraday, qui font l'objet du présent volume.
- A18** MASCART, M. E., *Traité d'électricité statique*, G. Masson, Paris, 1876.
- A19** NOLLET, M. l'Abbé, *Essai sur l'électricité des corps*, Frères Guerin, Paris, 1750.
- A20** NORMAN, Robert, *The Neue Attractive*, London, 1581. Édition ultérieure: London, 1720.

- A21 PRIESTLEY, Joseph, *Histoire de l'électricité*, traduit de l'édition anglaise de 1767, 3 volumes, chez Herissant le fils, Paris, 1771.
- A22 SIMARD, l'abbé Henri, *Traité élémentaire de Physique*, L'Action Sociale, Québec, 1925.
- A23 STILL, Alfred, *Soul of Amber*, chez Murray Hill, New York, 1944.
- A24 THE INTERNATIONAL CORRESPONDENCE SCHOOLS, *The Elements of Mechanical and Electrical Engineering*, volume III, The Colliery Engineer Co., Scranton, PA, 1898.
- A25 SIGAUD DE LA FOND, Joseph-Aignan, *Traité de l'électricité*, chez Des Ventes de la Doué, Paris, 1771.
- A26 THOMSON, Silvanus P., *Leçons élémentaires d'électricité et de magnétisme*, Librairie Industrielle, Paris, 1898.
- A27 WALDO DUNNINGTON, G., *Carl Friedrich Gauss: Titan of Science*, Exposition Press, New York, 1955.

Livres contemporains (1960-2005)

- C1 ACZEL, Amir D., *The Riddle of the Compass*, Harcourt Inc., New York, 2001.
- C2 BLONDEL, Christine, *Histoire de l'électricité*, Cité des sciences et de l'industrie, Pocket, Paris, 1994.
- C3 CHAMPEIX, Robert, *Savants méconnus, inventions oubliées*, Dunod, Paris, 1966.
- C4 CAMERON, Frank, *Cottrell: Samaritan of Science*, Research Corporation, Tucson, Arizona, 1993.
- C5 COHEN, Bernard, *Benjamin Franklin's Science*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1990.
- C6 CRESPIN, Roger, *L'électricité à la portée de tous*, Éditions techniques et scientifiques françaises, Paris, 1985.
- C7 DARRIGOL, Olivier, *Electrodynamics from Ampère to Einstein*, Oxford University Press, Oxford, 2000.
- C8 ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI), *Electricity, Today's Technologies, Tomorrow's Alternatives*, distribué par William Kaufmann Inc., Palo Alto, Californie, 1982.
- C9 ÉQUIPE, *L'électricité*, collection Passion des Sciences, Gallimard, Paris, 1993.
- C10 FARADAY, Michael, *On the Various Forces of Nature*, The Viking Press, New York, 1960.
- C11 FORD, R. A., *Homemade Lightning*, Tab Books, New York, 1996.
- C12 GAEIRNAERT, Eric, *L'ambre-Miel de Fortune et Mémoire de Vie*, Du Piat, Monistrol sur Loire, France, 2002.
- C13 GARY, Claude, *La foudre, nature, histoire, risques et protection*, Dunod, Paris, 2004.
- C14 HEILBRON, J. L., *Electricity in the 17th and 18th Centuries*, Dover, Mineola, New York, 1999.
- C15 HERMANT, A., LESAGE, C., *L'électricité atmosphérique et la foudre*, Presses Universitaires de France, collection *Que sais-je ?*, n° 3127, Paris, 1997.
- C16 LACROUX, G., *Les aimants permanents*, Éditions Tec & Doc, Paris, 1989 (ouvrage spécialisé).
- C17 LEPRINCE-RINGUET, Louis, *L'aventure de l'électricité*, collection L'Odyssée, Flammarion, Paris, 1983.
- C18 LIVINGSTON, James D., *Driving Force*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1996.
- C19 MASSAIN, Robert, *Physique et physiciens*, Éditions Magnard, Paris, 1982.
- C20 MOORE, A. D., *Electrostatics*, Laplacian Press, Morgan Hill, CA, 1997.
- C21 NEEDHAM, Joseph, *La science chinoise et l'Occident*, collection Points Sciences, Éditions du Seuil, Paris, 1973.
- C22 PEARCE WILLIAMS, L., *Michael Faraday*, Da Capo Series in Science, Da Capo Press, New York, 1965.
- C23 PFAENDER, H. G., SCHROEDER, H., *Schott Guide to Glass*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1983.
- C24 ROSS, Andrew, *Amber the natural time capsule*, The National History Museum, London, 1998.
- C25 SCHAAF, William L., *Carl Friedrich Gauss, Prince of Mathematicians*, Franklin Watts Inc., New York, 1964.
- C26 SEGRÈ, Emilio, *From Falling Bodies to Radio Waves*, W. H. Freeman and Company, New York, 1984.
- C27 STROTZKY, Nicolas, *La planète électricité*, collection Chemins, Éditions Hologramme, Neuilly, France, 1984.
- C28 VIOT, Nicolas, *Les aventuriers de l'énergie – Les 100 plus belles histoires de l'électricité*, Timée-Éditions, Boulogne, France, 2003.
- C29 ZANNOS, Susan, *Chester Carlson and the Development of Xerography*, Mitchell Lane Publishers, Bear, Delaware, 2003.

Dictionnaires et ouvrages encyclopédiques scientifiques

- D1 DAME, F., et coll., *Tout ce qu'il faut savoir en mathématique et physique, chimie, minéralogie, cristallographie, botanique, zoologie, sciences médicales, hygiène*, chez Librairie Delagrave, Paris, environ 1895.
- D2 GALIANA, T., RIVAL, M. et coll., *Dictionnaire des inventeurs et inventions*, Larousse, Paris, 1996.
- D3 GROLIER Limitée, *La Science pour tous*, encyclopédie en 8 volumes, Montréal, 1963-1964.
- D4 TATON, René, et coll., *Histoire générale des sciences*, 3 tomes, Presses Universitaires de France, Paris, première édition 1957-1964, deuxième édition 1966-1981.
- D5 TREVOR, Williams, *Biographical Dictionary of Scientists*, Harper Collins Publishers, Glasgow, 1994.
- D6 URBAIN, Georges, et BOLL, Marcel, *La science, ses progrès, ses applications*, tome 1 : *La science jusqu'à la fin du XIX^e siècle*, Larousse, Paris, 1933.

Livres contenant des expériences maison

- E1 ADAMCZYK, Peter, LAW, Paul-Francis, *Electricity and Magnetism*, collection « Usborne Understanding Science », Usborne Publishing Ltd., London, 1993.
- E2 ARDLEY, Neil, CARLIER, François, *Explore le magnétisme*, collection « Science pratique », Éditions Gamma et Éditions du Trécarré, Ville Saint-Laurent, Québec, 1985.
- E3 ARDLEY, Neil, CARLIER, François, *Découvre l'électricité*, collection « Science pratique », Éditions Gamma et Éditions du Trécarré, Ville Saint-Laurent, Québec, 1986.
- E4 DeLUCENAY LEON, George, *The Electricity Story*, ARCO Publishing Inc., New York, 1983.
- E5 DESJOURS, Pascal, *L'électricité, une énergie à maîtriser*, collection « Les petits débrouillards », Albin Michel Jeunesse, Paris, 2000.
- E6 ÉQUIPE, *À la découverte de la science*, Bordas Jeunesse, Paris, 1995.
- E7 ÉQUIPE, *Secrets de l'électricité statique*, Gallimard Jeunesse, Paris, 1997.
- E8 GRAF, Rudolf F., *Safe and Simple Electrical Experiments*, Dover, New York, 1973.
- E9 HERBERT, D., RUCHLIS, H., *Mr. Wizard's 400 Experiments in Science*, Book-Lab, North Bergen, NJ, 1968.
- E10 MATH, Irwin, *Wires & Watts*, Charles Scribner's Sons, New York, 1981.
- E11 REUBEN, Gabriel, *Electricity Experiments for Children*, Dover, New York, 1968.
- E12 THE THOMAS ALVA EDISON FOUNDATION, *The Thomas Edison Book of Easy and Incredible Experiments*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1988.
- E13 THOUIN, Marcel, *Problèmes de sciences et de technologie pour le préscolaire et le primaire*, Éditions MultiMondes, Québec, 1999.
- E14 UNESCO, *700 Science Experiments for Everyone*, Doubleday, New York, 1962.

Articles dans des magazines et revues

- M1 BANERJEE, Subir K., *Polar Flip-Flop, A Reversal of the Earth's Magnetic Field is Long Overdue*, The Sciences, novembre/décembre 1984, p. 24 à 30.
- M2 BLONDEL, Christine, *Coulomb et la nouvelle électricité «à la française»*, La Revue (Musée des arts et métiers, Paris), n° 31, décembre 2000, p. 27 à 34.
- M3 BRENNI, Paolo, *Les outils des électriciens du XVIII^e siècle*, La Revue (Musée des arts et métiers, Paris), n° 31, décembre 2000, p. 10 à 19.
- M4 BROMLEY, D. Allan, *The Development of Electrostatic Accelerators*, dans la revue *Nuclear Instruments and Methods*, Vol. 122, novembre/décembre 1974, North-Holland Publishing Co., p. 1 à 34.
- M5 DELÉGLISE, Aurélie, *Le Canada perd le nord*, revue *Québec Science*, mai 2002, p. 9 et 10. On y décrit l'emplacement actuel du pôle Nord magnétique, de même que la direction et la vitesse de son déplacement.
- M6 FARADAY, Michael, *Professor Faraday's Lectures on the Physical Forces: Lecture V. Magnetism-Electricity*, The Scientific American, vol. III, n° 21, 17 novembre 1860, p. 322 à 324. Reproduit dans la référence C10.

- M7 FREGONESE, Lucio, *L'électrostatique de Volta*, La Revue (Musée des arts et métiers, Paris), n° 31, décembre 2000, p. 35 à 42.
- M8 GRIMALDI, David A., *Captured in Amber*, Scientific American, avril 1996, p. 84 à 91.
- M9 KOCH TORRES ASSIS, Andre, et al., *Gauss and Weber's Creation of the Absolute System of Units in Physics*, 21st Century Science & Technology, Automne 2002, p. 40 à 48.
- M10 MOTTELAY, P. F., *Chronological History of Electricity, Galvanism, Magnetism and the Telegraph, from B.C. 2637 to A.D. 1888 – Part I*, The Electrical World, vol. XVII, n° 22, 30 mai 1891, p. 390.
- M11 NORTON, G. A. et al., *A Retrospective of the Career of Ray Herb*, compte-rendu de la 8^e conférence internationale *Heavy Ion Accelerator Technology*, The American Institute of Physics, 1999, p. 3 à 23.
- M12 PETSCH, Rudolf, *The Invention of the Electromagnetic Telegraph-IV*, The Electrical World, vol. XXVI, n° 11, 14 sept. 1895, p. 285. On y parle de Carl Fredrich Gauss (épisode 1-13).
- M13 RÉDACTION, *A New and Interesting Electrical Machine*, Scientific American, 3 février 1883, p. 71. Il s'agit de la nouvelle machine électrostatique à influence de Whimshurst.
- M14 TISSANDIER, Gaston, *Condensation des fumées par l'électricité statique*, La Nature, n° 668, 20 mars 1886, p. 241 et 242, accessible en ligne sur le site du Conservatoire des arts et métiers (www.cnam.fr).
- M15 WEIR HOME, Roderick, *L'électricité avant Volta, Galvani et Coulomb*, La Revue (Musée des arts et métiers, Paris), n° 31, décembre 2000, p. 21 à 26.

Brevets d'invention

Les brevets ci-dessous peuvent être téléchargés à partir du RÉSEAU ESPACENET (http://fr.espacenet.com/espacenet/fr/fr/e_net.htm). Ce service gratuit est offert par l'Organisation européenne des brevets, par le biais l'Office européen des brevets et les services nationaux. Il suffit d'entrer les numéros des brevets dans la case appropriée.

- B1 BROWN, Thomas Townsend, *Appareils et procédés électrocinétiques*, brevet français n° fr1207519, délivré le 7 septembre 1959 (demandé le 24 juin 1958). Brevet relié à l'épisode 2-24.
- B2 BROWN, Thomas Townsend, *Electrokinetic Aparatus*, brevet américain n° us2949550, délivré le 16 août 1960 (demandé le 3 juillet 1957). Brevet relié à l'épisode 2-24.
- B3 BROWN, Thomas Townsend, *Electrohydrodynamic Fluid Pump*, brevet américain n° us3267860, délivré le 23 août 1966 (demandé le 31 décembre 1964). Brevet relié à l'épisode 2-24.
- B4 CAMPBELL, Jonathan W., *Apparatus and Method for Generating Thrust Using a Two Dimensional, Asymmetrical capacitor module*, brevet américain n° us6317310, délivré le 13 novembre 2001 (demandé le 8 mars 2000). L'inventeur travaille pour la NASA. Brevet relié à l'épisode 2-24.
- B5 CAMPBELL, Jonathan W., *Apparatus for Generating Thrust Using a Two Dimensional, Asymmetrical capacitor module*, brevet américain n° us6411493, délivré le 25 juin 2002 (demandé le 20 septembre 2001). L'inventeur travaille pour la NASA. Brevet relié à l'épisode 2-24.
- B6 DE SEVERSKI, Alexander P., *Ionocraft*, brevet américain n° us3130945, délivré le 28 avril 1964 (demandé le 31 août 1959). Le major De Severski a construit des petits appareils apparentés aux « lifters » (épisode 2-24).

Sites Internet sur le loisir scientifique et la pédagogie des sciences

- Wlp1 BOÎTE À SCIENCE (www.boiteascience.com). Organisme de loisirs et de culture scientifiques de la région de Québec, affilié au *Conseil de développement du loisir scientifique*. Impliqués activement dans l'animation avec les enfants et des adolescents, dans les écoles, les bibliothèques municipales, les camps de vacance, ou leur *Salle de découvertes*. Plusieurs fiches pédagogiques en ligne.
- Wlp2 CHAIRE CRSNG/ALCAN-U. LAVAL, *Outils Pédagogiques Utiles en Sciences* (www.fsg.ulaval.ca/opus). Ce site, mis sur pied par la professeure Claire Deschênes, titulaire de la chaire, constitue un guichet de ressources pédagogiques incluant de l'information scientifique, des fiches d'activités scientifiques, des actualités scientifiques et des informations sur les diverses carrières en sciences. La clientèle cible correspond aux adolescents.
- Wlp3 CONSEIL DE DÉVELOPPEMENT DU LOISIR SCIENTIFIQUE (www.cdls.qc.ca). Pour tous ceux qui veulent explorer la science à travers le loisir scientifique, au Québec. Plusieurs activités annoncées dont les *Expo-sciences*, le *Défi inventif* et le *Défi apprenti génie*. Des hyperliens avec les organismes régionaux sont disponibles.

- Wlp4 ÉLECTRICITÉ DE FRANCE (EDF) (www.edf.fr). Le site Internet de ce fournisseur d'électricité comporte une section éducative présentant du matériel pédagogique sur l'électricité. On y trouve de la documentation scientifique, des jeux, un « dictionnaire électrique » et des hyperliens à des activités ludo-éducatives.
- Wlp5 HYDRO-QUÉBEC (www.hydroquebec.com/fr). Ce fournisseur d'énergie électrique offre sur son site une section pleine de ressources pour mieux faire comprendre différents aspects de l'électricité : sa production, sa distribution, la consommation, les règles de sécurité et même les orages magnétiques.
- Wlp6 LA MAIN À LA PÂTE (www.inrp.fr/lamap). Projet parrainé par l'Institut national de recherche pédagogique (INRP) et l'Académie des sciences de France pour promouvoir l'enseignement des sciences au primaire. Ce site met à la disposition des enseignants des ressources de toutes sortes.
- Wlp7 LE SAUT QUANTIQUE, Le Centre d'innovation pédagogique en sciences au collégial (www.apsq.org/sautquantique). Ce site, dont l'instigatrice est M^{me} France Garnier (ex-professeure de chimie au Cégep de Trois-Rivières), constitue un réseau d'échange entre les professeurs de sciences du collégial de même qu'une banque d'informations, d'outils et de matériel pédagogique.
- Wlp8 LES DÉBROUILLARDS (www.lesdebrouillards.qc.ca). Mouvement éducatif scientifique bien connu s'adressant aux jeunes de moins de 14 ans. Le site comporte le *Journal Scientifx*, des expériences à réaliser, des hyperliens classés par thèmes, et les informations pour le *Défi des classes débrouillardes*.
- Wlp9 PISTES (Projet d'intégration des Sciences et Technologies en Enseignement au Secondaire) (www.pistes.org). Projet de la Faculté des sciences de l'éducation de l'Université Laval, piloté par la professeure Louise Guilbert. On y retrouve des activités et des outils pédagogiques, des nouvelles, un répertoire de sites Internet avec analyse critique et un forum d'échange.
- Wlp10 PLANÈTE SCIENCES (www.planete-sciences.org). Organisme existant depuis 1962, comporte plusieurs délégations régionales en France. Il propose aux jeunes des activités scientifiques en classe ou dans un contexte de loisir lors de séjours vacances.
- Wlp11 SOCIÉTÉ POUR LA PROMOTION DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE (www.spst.org). Organisme québécois de promotion de la culture et du loisir scientifique. Le site présente une base de données pour les ressources pédagogiques, un cybermagazine : *Pluie de science*, l'activité Les Innovateurs à l'école, une section sur la promotion du livre de vulgarisation scientifique, et d'autres ressources.
- Wlp12 SCIENCE POUR TOUS (www.sciencepourtous.qc.ca). Organisme dédié à la culture et au loisir scientifique au Québec. Le site contient des hyperliens pour des ressources pédagogiques, un journal électronique : *La Toile scientifique*, de la documentation sur les politiques scientifiques, et une base de données sur les divers organismes reliés à la culture et au loisir scientifique. Mandat de lobby politique.

Sites Internet à caractère scientifique et technique

- Wst1 BEATY, Bill, *Van de Graaff Electrostatic Generator* (www.eskimo.com/~billb/emotor/vdg.html). Site Internet contenant une profusion d'informations sur la théorie et la fabrication de machines Van de Graaff ainsi que sur leur utilisation pour diverses expériences d'électrostatique.
- Wst2 BLAZE LABS (www.blazelabs.com). Site de l'ingénieur SAVIOUR, dans lequel on retrouve les résultats de ses expériences sur plusieurs projets de recherche, dont celui des « lifters » (épisode 2-24).
- Wst3 DE QUEIROS, Antonio C. M., *Electrostatic Machines* (www.coe.ufrj.br/~acmq/electrostatic.html). Site Internet avec beaucoup d'information et d'illustrations sur l'histoire, la théorie et la fabrication de différents types de machines électrostatiques.
- Wst4 FORCEFIELD (www.wondermagnet.com). Forcefield est une petite entreprise américaine qui met à la disposition des bricoleurs plusieurs produits magnétiques. La section FAQ (Frequently Asked Questions) de leur site Internet contient beaucoup d'information sur les différents types d'aimants.
- Wst5 HOWSTUFFWORKS (www.howstuffworks.com). Site de vulgarisation scientifique expliquant le fonctionnement de plusieurs appareils, dont les photocopieuses, les imprimantes au laser, les projecteurs multimédias à micromiroirs, et les générateurs Van de Graaff, parmi une multitude d'autres appareils.
- Wst6 JLN LABS (www.jlnlabs.org). Site de Jean-Louis NAUDIN dans lequel on retrouve les résultats de ses expériences sur plusieurs projets de recherche, dont celui des « lifters » (épisode 2-24). Naudin y présente des photos, des vidéoclips et une multitude d'informations et d'hyperliens sur les projets traités.
- Wst7 NATIONAL ELECTROSTATICS CORP., *Pelletron Accelerators* (www.pelletron.com/index.html). Les accélérateurs électrostatiques de type Pelletron vendus par cette compagnie constituent un perfectionnement des accélérateurs Van de Graaff. Ces nouveaux accélérateurs utilisent des chaînes spéciales, développées dans les années 1960, au lieu d'une courroie. Plusieurs applications modernes y sont décrites.

- Wst8 STERN, David, PEREDO, M., (www-istp.gsfc.nasa.gov/Education/Intro.html). Site éducationnel sur la magnétosphère terrestre et le vent solaire.
- Wst9 TEXAS INSTRUMENTS, *Digital Light Processing (DLP)* (www.dlp.com). Site d'information sur les matrices de micromiroirs électrostatiques et la technologie DLP, pour la projection numérique d'images.

Sites Internet reliés à l'histoire des sciences

- Whs1 BURNDY LIBRARY (Dibner Institute for the History of Science and Technology) (<http://dibinst.mit.edu/BURNDY/BurndyHome.htm>). Cette bibliothèque située sur le Campus du MIT (Massachusetts Institute of Technology) à Cambridge, aux États-Unis, contient plus de 50 000 livres sur l'histoire des sciences et des technologies. On peut y effectuer une recherche en ligne dans le répertoire de la bibliothèque.
- Whs2 GALLICA (BIBLIOTHÈQUE NATIONALE DE FRANCE) (<http://gallica.bnf.fr>). Gallica constitue une bibliothèque unique de livres rares numérisés. On y retrouve plus de 70 000 livres, à caractère patrimonial ou encyclopédique, accessibles en ligne, dont un bon nombre en science. Il suffit d'inscrire les mots *électricité* ou *magnétisme* dans l'engin de recherche pour avoir accès aux livres anciens reliés au présent ouvrage.
- Whs3 LE CONSERVATOIRE NUMÉRIQUE DES ARTS ET MÉTIERS (www.cnum.cnam.fr). Ce site offre des possibilités exceptionnelles à quiconque veut explorer l'histoire des sciences et des technologies. On y retrouve une bibliothèque numérisée de livres et de revues scientifiques anciens, accessibles en ligne. La période couverte actuellement par ces ouvrages s'étend du 16^e siècle jusqu'au début du 20^e siècle.
- Whs4 LIBRARY OF CONGRESS (Portail Z39.50) (www.loc.gov/z3950/gateway.html). Cette page du site de la Bibliothèque du Congrès, aux États-Unis, permet d'avoir accès aux répertoires des bibliothèques universitaires et gouvernementales d'Amérique du Nord principalement, et de bien d'autres bibliothèques dans le monde. C'est génial pour localiser un livre d'intérêt.
- Whs5 MUSEUM OF THE HISTORY OF SCIENCE (www.mhs.ox.ac.uk). Ce site contient des banques de données précieuses où on peut trouver des images anciennes (plus de 8 500), des fiches descriptives d'instruments scientifiques anciens (près de 14 000), et des fiches descriptives des livres scientifiques antiques et modernes reliés à l'histoire des sciences, et faisant partie de leur bibliothèque (environ 20 000).
- Whs6 SMITHSONIAN INSTITUTION LIBRARIES (Scientific Identity) (www.sil.si.edu/digitalcollections/hst/scientific-identity/). Cette section du site des bibliothèques de l'Institution Smithsonian donne accès à une banque numérisée de plus de 1 000 portraits de scientifiques, avec une très bonne résolution, que l'on peut télécharger gratuitement, pour des fins personnelles et éducatives non commerciales.

PROVENANCE DES ILLUSTRATIONS

Signification des abréviations. Les épisodes sont identifiés par la lettre **É** suivie du numéro de l'épisode. L'assignation de la provenance d'une illustration, dans un épisode, est désignée par le numéro de la figure suivi du signe =. La catégorie d'illustration est définie immédiatement après: **d** pour un dessin, **p** pour une photographie, **n** pour une numérisation dans un ouvrage ancien, **g** pour un graphique et **t** pour un tableau. La provenance des illustrations est décrite entre parenthèses. Les lettres **Au** représentent l'auteur du présent ouvrage (Pierre Langlois). Dans le cas des numérisations dans les ouvrages anciens, **n**, les parenthèses comprennent deux ou trois termes, séparés par une virgule. Le premier terme constitue l'**abréviation de la référence à l'ouvrage**, que l'on retrouve dans la section **RÉFÉRENCES**, ci-dessus. Les deuxième et troisième termes représentent la **localisation de l'ouvrage**. La présence des lettres **Au** dans le deuxième terme signifie que l'ouvrage appartient à la collection personnelle de l'auteur.

Le départ d'une grande aventure

É 0-1: 1=p (Au), 2=p(Au), 3=d (Au), 4=d (Au)

Chapitre 1: Le magnétisme des aimants

É 1-1: 1=p (Au), 2=d (Au), 3=d (Au) • É 1-2: 1=n (Musée de la civilisation, Québec), 2=d (Au), 3=d (Au), 4=d (Au)
• É 1-3: 1=n (A13-1892, Au), 2=n (A13-1892, Au), 3=d (Au), 4=d (Au), 5=d (Au) • É 1-4: 1=n (A13-1892, Au),
2=n(A15, Au), 3=d (Au) • É 1-5: 1=n (A13-1892, Au), 2=d (banque d'images Corel Gallery 2), 3=n (A13-1892, Au),
4=d (Au) • É 1-6: 1=n (M10, Musée de la Civilisation, Québec), 2=n (A13-1892, Au), 3=d (Au), 4=d (Au) • É 1-7:
1=n (A6-1905, université Laval, Québec), 2=(A13-1892, Au), 3=n (A9, Au), 4=d (Au) • É 1-8: 1=p (Réunion des
Musées Nationaux de France/Art Resource, NY), 2=n (A4-1884, Au), 3=d (Au), 4=d (Au) • É 1-9: 1=n (A4, Au),
2=n (A15, Au), 3=d (Au), 4=d (Au), 5=d (Au), 6=d (Au) • É 1-10: 1=n (A4, Au), 2=n (A4, Au), 3=d (Au), 4=g (Au)
• É 1-11: 1=n (A4, Au), 2=d (Au), 3=g (Au) • É 1-12: 1=n (A4, Au), 2=n (A15, Au), 3=n (A15, Au), 4=n (A15, Au),
5=d (Steele Hill-SOHO/NASA) • É 1-13: 1=n (A16, université Laval, Québec), 2=n (M12, Musée de la civilisation,
Québec), 3=d (Au), 4=d (Au), 5=n (A3, université de Montréal) • É 1-14: 1=n (A15, Au) + p(Au), 2=d (Au), 3=d
(Au), 4=t (Au), 5=t (Au), 6=d (Au) • É 1-15: 1=d (Metso Minerals), 2=p (Metso Minerals)

Chapitre 2: L'électricité statique

É 2-1: 1=n (A13-1892, Au), 2=n (M10, Musée de la Civilisation, Québec), 3=d (Au) • É 2-2: 1=n (A9, Au), 2=n (A9,
Au), 3=p (banque d'images Art Explosion 125,000), 4=d (Au) • É 2-3: 1=n (A26, Musée de la civilisation, Québec),
2=n (A19, Musée de la civilisation, Québec), 3=d (Au) • É 2-4: 1=n (A9, Au), 2=n (A15, Au), 3=n (A15, Au), 4=d
(Au) • É 2-5: 1=n (A15, Au), 2=d (Au) + n (A19, Musée de la civilisation, Québec), 3=n (M6, Musée de la civilisation,
Québec), 4=d (Au) • É 2-6: 1=n (A15, Au), 2=d (Au), 3=n (A15, Au), 4=d (Au) • É 2-7: 1=n (A15, Au), 2=d (Au),
3=d (Au) • É 2-8: 1=n (A15, Au), 2=n (A15, Au), 3=d (Au), 4=d (Au) • É 2-9: 1=n (A15, Au), 2=n (A9, Au), 3=n (A9,
Au), 4=d (Au), 5=d (Au) • É 2-10: 1=d (Au), 2=n (A15, Au), 3=d (Au), 4=d (Au) • É 2-11: 1=n (A4, Au), 2=n (A4,
Au) • É 2-12: 1=n (A4, Au), 2=n (A11, Musée de la civilisation, Québec), 3=d (Au), 4=d (Au) • É 2-13: 1=n (A8-1849,
Musée de la civilisation, Québec) + d (Au), 2=d (Au) • É 2-14: 1=n (A15, Au), 2=n (A24, Au), 3=d (Au), 4=d (Au) •
É 2-15: 1=n (A15, Au), 2=d (Au), 3=d (Au), 4=d (Au) • É 2-16: 1=n (A9, Au), 2=n (A15, Au), 3=n (A15, Au), 4=n
(A15, Au) • É 2-17: 1=n (A18, Musée de la civilisation, Québec), 2=n (A15, Au), 3=n (M13, Musée de la civilisation,
Québec), 4=d (Au) • É 2-18: 1=d (Au) • É 2-19: 1=d (Au), 2=n (A15, Au), 3=n(A15,Au), 4=p (Museum of Science,
Boston) • É 2-20: 1=d (Au), 2=p (National Electrostatics Corporation) • É 2-21: 1=n (M14, Conservatoire des Arts
et Métiers, Paris), 2=p (Research Corporation), 3=d (Au), 4=p (Wheelabrator Air Pollution Control Inc.), 5=d (Au)
• É 2-22: 1=p (Xerox), 2=d (Au), 3=p (Xerox), 4=p (Xerox), 5=p (Xerox) • É 2-23: 1=p (Texas Instruments), 2=d
(Texas Instruments), 3=d (Texas Instruments), 4=d (Texas Instruments) • É 2-24: 1=d (Au), 2=d (Au), 3=d (Au),
4=p (Jean-Louis Naudin), 5=p (Jean-Louis Naudin)

INDEX

A

accélérateurs Pelletron 89
acier 30, 35, 46
AEPINUS 62
aimantation 16, 24, 35, 46
aimantation induite 30
aimants 28, 36, 46, 49
 acier au cobalt 47
 alnico 47
 ferrite ordinaire 47
 ferrite polarisée 47
 néodyme-fer-bore 47
ambre 16
armatures 26, 46
aurores boréales 42

B

balance à torsion 38, 40, 72
Battelle Memorial Institute 93
BENNET 78, 84
BOSE 83
boussole 20, 22, 28, 37, 39, 49
 boussole d'inclinaison 44
bouteille de Leyde 66
BOYLE 54

C

CABEO 54
cage de Faraday 70, 80
CAMERON 97
CANTON 62
CARLSON 92
CAVENDISH 72
champ magnétique 32, 43, 46
 champ magnétique de désaimantation 47
 champ magnétique rémanent 47
 champ magnétique terrestre 44
COLOMB 20, 42
condensateur électrique 66
conducteurs 56
constante diélectrique 76
COTTRELL 90
COULOMB 34, 36, 38, 40, 42, 72, 74
CUNÉUS 66
cylindre de Faraday 78

D

DALIBARD 68
DE CISTERNAY DUFAY 58
déclinaison magnétique 20, 42
DELLA PORTA 24
DE MARICOURT 22, 28
DESCARTES 32
détecteur à fils 59
diélectriques 76

E

éclair 69
éclateur 86
effet Biefeld-Brown 97
effet corona 87, 93, 96
effet des pointes 68
électricité 15
 deux sortes d'électricités 58, 60
 électricité négative 58
 électricité positive 58
 électricité résineuse 58
 électricité vitrée 58
électrisation par influence 62
électromètre 78
électrophore 64, 84
électroscope 52, 78
étincelle électrique 65, 86
excitation magnétique coercitive 48

F

FARADAY 60, 70, 76, 78, 80
fer 30, 35
fluides magnétiques 34, 38
forces magnétiques 40
forces entre deux charges électriques 73
foudre 69
FRANKLIN 60, 62, 66, 68, 70

G

GAUSS 44, 46
GILBERT 24, 26, 28, 30, 32, 52
GRAY 56

H

HAUKSBEE 82
haute tension 86
HENLEY 78

- HERB 89
HOLTZ 84
HORNBECK, 94
HUMBOLDT 43, 44
- I**
IBM 93
imprimante laser 93
inclinaison magnétique 28, 44
induction électrostatique 62, 64
ions 96
isolants 56, 76, 78
- J**
JAMIN 46
- L**
lifter 97
LODGE 90
- M**
machines électrostatiques 54, 82, 86
 machines à influence 84
 machine de Nairne 83
 machine de Ramsden 83
 machine de Toepler 84
 machine Van de Graaff 87
 machine de Wimshurst 85
magnétite 16, 24
micromiroirs électrostatiques 94
MISHIMA 47
molécules magnétiques 34, 36
moment magnétique 45
MUSCHENBROEK 66
- N**
NAUDIN 97
NICHOLSON 84
 doubleur de Nicholson 84
NOLLET, abbé 83
NORMAN 28
- O**
orage magnétique 43
- P**
paratonnerre 69
peinture électrostatique 91
photoconductivité 92
photocopies 92
PICARD, abbé 82
pierre d'aimant 16, 22, 26
pointes métalliques 74
pôles magnétiques 16, 20, 22, 28, 34, 38
 pôles magnétiques induits 32
précipitateur électrostatique 90
projecteur à micromiroirs 95
propulsion électrocinétique 96
- R**
RAMSDEN 83
RAY 47
répartition de l'électricité 74
répulsion électrique 54
Research Corporation 91
- S**
séparateurs magnétiques 49
spectres magnétiques 32
STRNAT 47
- T**
technologie DLP™ 95
tension 86
Terre 28, 43
terrella 28
Tesla 46
Texas Instruments 94
THALÈS 16
TOEPLER 84
TOWNSEND BROWN 96
- V**
VAN DE GRAAFF 87
vent ionique 96
vent solaire 43
verre flint 82
versorium 52
volt 86
VOLTA 64, 86
VON GUERICKE 54
VON KLEIST 66
- W**
WHEELER 56
WILSON 83
WIMSHURST 85
WINCKLER 83
- X**
xérogaphie 92
Xerox 92

Une initiation à l'électricité par l'histoire et l'expérimentation

Sur la route de l'électricité est un ouvrage en trois volumes qui vise à *stimuler le goût des sciences auprès des jeunes*, en misant sur l'histoire et l'expérimentation maison. L'approche structurée et systématique entraîne le lecteur dans un processus graduel de découvertes, de l'Antiquité à aujourd'hui, à travers des épisodes abondamment illustrés.

Cette nouvelle approche pédagogique, qui interpelle beaucoup l'émotion, la créativité et le plaisir, met l'accent sur les expériences, les observations et les réflexions des savants, replacées dans leur contexte historique. Le lecteur est invité à reproduire lui-même plusieurs de ces expériences historiques, avec du matériel facile à trouver chez soi ou à la quincaillerie.

Les enseignants y découvriront un matériel complémentaire stimulant pour leurs cours de physique, et *les adolescents*, un divertissement scientifique à leur niveau. Même *les scientifiques* prendront plaisir à y découvrir l'histoire de l'électricité racontée de façon bien particulière.

Témoignages

Dans cet ouvrage unique en trois volumes, l'auteur déchire élégamment le voile qui cache la nature de l'électricité et ses milliers de manifestations. Il le fait d'une façon qui fascinera à la fois les jeunes et moins jeunes. Il étonnera même les experts, ingénieurs et physiciens.

L'auteur, Pierre Langlois, est non seulement un scientifique rigoureux et érudit, mais aussi un pédagogue sans égal. Il démontre dans cet ouvrage une grande habileté technique et une superbe sensibilité à l'efficacité de l'apprentissage. La conception et la réalisation des expériences décrites dans cet ouvrage représentent un chef-d'œuvre pédagogique.

Jean-René Roy,
astrophysicien,
Directeur scientifique,
Observatoire Gemini, Hawaï

L'enseignement de la physique met trop souvent en avant l'édifice mathématique, qui malheureusement assèche la curiosité des jeunes. Pierre Langlois nous propose ici une autre voie, extrêmement inspirante, où il place la découverte au premier plan.

Avec ce livre, l'auteur ouvre aux jeunes et à tout ceux qui se sentent attirés une nouvelle porte, grande et lumineuse, sur le monde de la science, et emprunte avec eux une route qui est bien réelle, délaissant l'habituel raccourci éthéré.

Quel plaisir j'ai eu à l'y suivre! C'est comme ça que j'aurais souhaité être initié à la physique.

Louis Taillefer,
professeur de physique, Université de Sherbrooke,
Directeur, Programme sur
les matériaux quantiques,
Institut canadien de recherches avancées



PIERRE LANGLOIS est détenteur d'un doctorat en physique obtenu à l'Université Laval de Québec, en 1981. Tout au long de sa carrière de chercheur, il s'est impliqué activement en vulgarisation scientifique. Il compte à son actif des chroniques pour les jeunes dans le journal *Le Soleil* de Québec (1984-1985), des fascicules d'activités pour le Conseil du loisir scientifique de Québec (1991) et de multiples conférences et ateliers sur l'histoire et la vulgarisation des sciences.

Pierre Langlois possède vingt ans d'expérience en optique dans divers instituts de recherche industriels et laboratoires universitaires, en France et au Canada (dont dix ans à l'Institut National d'Optique – INO). Il est présentement consultant, auteur et conférencier.

ISBN 2-89544-075-1



9 782895 440758