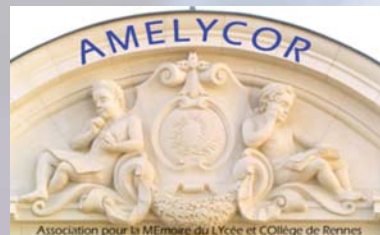


A l'occasion de l'exposition "Volt(A) de l'étincelle à la pile" conçue et réalisée par le Musée des Arts et Métiers, présentée et animée à Rennes par l'Espace des Sciences, l'Amélycor (Association pour la mémoire du Lycée et du Collège de Rennes) proposait de septembre à novembre 2003 au Lycée et Collège Emile-Zola une série de conférences sur l'histoire de l'électricité de l'Antiquité à Volta, ainsi que des visites des collections d'instruments scientifiques anciens du Lycée. Cette "petite histoire" reprend pour l'essentiel le contenu de ces conférences, et garde la trace de leur caractère oral : les encadrés en italique correspondent notamment à la description des expériences, des instruments anciens ou des documents historiques appartenant aux collections du Lycée qui étaient présentés au public au cours de l'exposé.



Conception graphique : SynapZ 02 99 04 68 03. Reproduction : Identific 02 99 26 10 10

# UNE PETITE HISTOIRE DE L'ÉLECTRICITÉ, DE L' ANTIQUITÉ À VOLTA B. WOLFF

Association AMELYCOR





Au lycée Emile Zola, Bertrand Wolff et son "oeuf électrique"...

Je tiens à remercier :

**L'Espace des Sciences**, et plus particulièrement son directeur Michel Cabaret pour son amical soutien.

**Christine Blondel**, historienne des sciences - CNRS, dont les conseils et les remarques critiques m'ont été si utiles.

**Bruno Jacomy**, directeur-adjoint du Musée des arts et métiers, qui a depuis les débuts soutenu les projets de l'association Amelycor.

L'ami **Jean-Noël Cloarec**, infatigable président de l'Amelycor, qui n'a ménagé ni son temps ni ses efforts pour que cette édition, qui lui doit, parmi bien d'autres choses, l'essentiel de ses documents photographiques, puisse voir le jour.

Bertrand Wolff

## Une petite histoire de l'électricité, de l'Antiquité à Volta

### Editorial

Michel Cabaret, *directeur de l'Espace des Sciences*

p. 5

### Volt(a), de l'étincelle à la pile

Elizabeth Drye, *commissaire de l'exposition au Musée des arts et métiers*

p. 6

### Petite histoire de l'électricité, de l'Antiquité à Volta

Bertrand Wolff, *professeur au lycée Emile-Zola (Rennes)*

p. 8



Magnifique bouteille de Leyde surmontée d'un angelot, une des plus belle pièces montrées à Rennes (Musée des arts et métiers)

Une expérience de l'Abbe Nollet

## E D I T O R I A L

Mettre les sciences à la portée du plus grand nombre à Rennes, en Bretagne et au-delà, tel est l'objectif que s'est fixé l'Espace des sciences dès sa création en 1984.

L'exposition "Volta, de l'étincelle à la pile" créée par le Musée des Arts et Métiers a été présentée pour la première fois en région et c'est l'Espace des sciences de Rennes en 2003-2004 qui a eu l'honneur d'accueillir ces magnifiques pièces de collection, la pile de Volta et bien d'autres. Dès le début de cette opération la dynamique association Amélycor présidée par Jean-Noël Cloarec s'est associée au projet en nous proposant des animations, conférences et visites découvertes du patrimoine scientifique de l'actuel Lycée Emile-Zola. Bertrand Wolff, professeur au sein de ce lycée s'est proposé de rédiger "Une petite histoire de l'électricité, de l'Antiquité à Volta" que nous sommes très heureux de publier. En choisissant le titre de sa publication Bertrand Wolff a voulu d'entrée de jeu se situer dans une perspective historique, de l'électricité qui se cache à la pile qui en permet le stockage. De tout temps l'électricité a fasciné les hommes mais c'est au XVIII<sup>ème</sup> siècle que les cabinets de curiosités scientifiques proposeront de brillantes démonstrations d'électricité qui étonneront et amuseront la haute société.

Espérons que ce document valorisera également les conférences sur l'histoire de l'électricité présentées au Lycée Zola et qu'il sera utile aux enseignants et animateurs qui s'intéressent à la diffusion de la culture scientifique.

**Michel Cabaret**

*Directeur de l'Espace des sciences*

## Elisabeth DRYE,

commissaire de l'exposition au Musée  
des arts et métiers

# VOLT(A), De l'étincelle à la pile

### L'électricité dans ses premières grandeurs

Le 20 mars 1800, Alessandro Volta, savant italien professeur de physique expérimentale à l'université de Pavie, envoie à Joseph Banks, président de la Royal Society de Londres, une lettre restée célèbre dans laquelle il annonce, en français, la nouvelle de l'invention de la pile. Pour la première fois, il était possible, et même facile, de produire en continu de l'électricité, ce qui constituait un progrès immense par rapport aux décharges rapides et fugaces d'électricité statique, dont savants et expérimentateurs devaient se contenter jusque-là. A peine la lettre de Volta à la Royal Society est-elle connue que l'invention suscite un intérêt immense partout dans le monde.

Deux cents ans plus tard, la pile est toujours un élément incontournable de notre quotidien ; elle risque même de changer radicalement l'avenir des véhicules à moteur, les recherches sur la pile à combustible laissant apparaître des possibilités révolutionnaires.

Le Musée des arts et métiers, riche d'une collection exceptionnelle d'objets de physique du XVIII<sup>e</sup> siècle liés aux recherches sur l'électricité, avait tenu à célébrer le bicentenaire de l'invention de la pile par une exposition temporaire qui s'était tenue dans ses murs. Sur la demande du directeur de l'Espace des sciences de Rennes, une partie de cette exposition a été présentée

au centre Colombia où les visiteurs ont pu découvrir la pile de Volta, l'aboutissement de recherches passionnées, d'expériences parfois risquées, témoins de l'insatiable curiosité à l'égard de ce phénomène étrange et merveilleux, l'électricité. Les collections du Lycée Emile-Zola à Rennes ont complété magnifiquement les prêts du Musée des arts et métiers, tandis que le savoir-faire des médiateurs de l'Espace des sciences et des enseignants a donné à cette exposition une dimension pédagogique tout à fait remarquable.

### Les prémisses d'un projet

Dès 1998, la célébration du bicentenaire de la pile commençait à s'organiser dans beaucoup de pays et de nombreuses institutions. Le Musée des arts et métiers, en collaboration avec l'Institut culturel italien, décide d'élargir le propos et de l'étendre à trois grands savants qui ont marqué les découvertes sur l'électricité au XVIII<sup>e</sup> siècle : Volta, Galvani et Coulomb. Un séminaire est organisé à l'Institut culturel italien où intervinrent les scientifiques spécialistes de l'histoire de l'électricité : John Heilbron, Fabio Bevilacqua, Giuliano Pancaldi et Christine Blondel, qui présentèrent les hommes, Pietro Corsi, Rafaella Simili, Walter Bernardi, Marco Ciardi, Marco Beretta et Christian qui parlèrent des sciences, et Daniel Roche, Marco Segala et Girolamo Ramunni qui traitèrent de la société.

Les communications furent passionnantes, plus particulièrement l'accent fut mis sur les différences qui opposent ces trois savants dans leur personnalité, leur parcours, leurs milieux : Charles Coulomb, l'ingénieur militaire français, féru de mathématiques, homme de terrain (il construit un fort en Martinique), infatigable chercheur, il reçoit un prix pour ses "Recherches sur la meilleure manière de fabriquer les aiguilles aimantées" et conçoit sa fameuse balance de torsion d'où il tire une loi qui fera date dans l'histoire de l'électricité. Luigi Galvani, le médecin physiologiste italien, faisant ses recherches sur les grenouilles et les torpilles dans son laboratoire, sort peu de Bologne, découvre une nouvelle manifestation d'électricité qu'il appelle "électricité animale", qui va susciter la fameuse controverse avec Volta et d'où ressortira la découverte de la pile. Alessandro Volta, physicien italien connu, célèbre universitaire, grand voyageur, en relation avec les savants européens de l'époque, parlant plusieurs langues, termine sa vie comblé d'honneurs.

Une époque, trois hommes, trois styles, trois vies complètement différentes.

Dans un premier temps, le synopsis tendait donc à mettre en évidence les recherches communes sur la nature, la mesure de l'électricité dans la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> siècle et les différences, différends dans le cas de Galvani et Volta, opposant ces trois figures scientifiques majeures. Sans oublier bien sûr au centre de l'exposition, la pile, ce qu'elle est devenue en 1900, puis 2000.

### Evolution du projet

Une salle d'exposition aux murs non extensibles, la difficulté de tout dire (milieux, expériences, personnages, objets) sans être confus, la nécessité de suivre un fil narratif simple et facilement repérable nous a amenés à aborder le sujet différemment. Nous avons choisi de mettre en figure centrale Volta, le projet était en effet parti du bicentenaire de la pile, et de traiter Coulomb et Galvani par rapport au savant de Côme. Par ailleurs, étant donné la tradition du Musée des arts et métiers et ses magnifiques collections, nous avons préféré évoquer la fascination exercée par le phénomène de l'électricité et les recherches qu'il suscitait à travers les objets utilisés pour les expériences, expériences de salon, amusantes ou savantes. Dans l'espace principal de la salle d'expositions temporaires, trois parties distinctes amenaient petit à petit le visiteur au cœur du sujet : le monde scientifique au XVIII<sup>e</sup> siècle, les expériences de physique, la carrière de Volta à travers ses quatre inventions majeures avec, en dernier lieu, la pile.

### L'exposition proprement dite

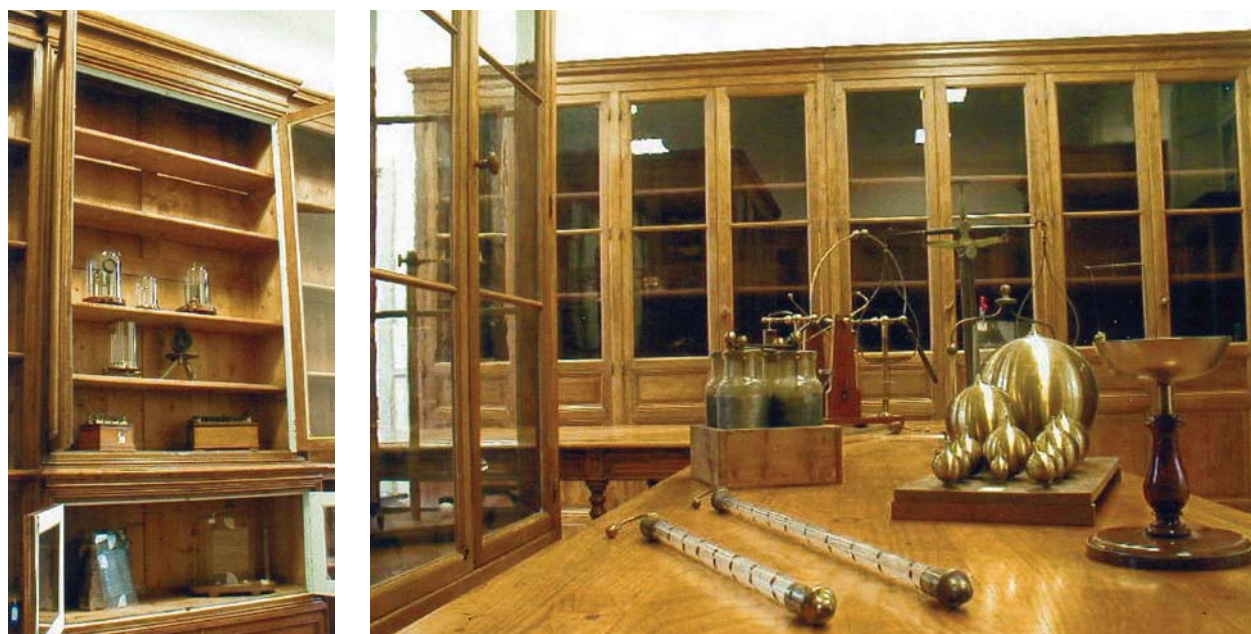
La première partie présentait dans des vitrines des objets touchant à l'électricité, tels qu'on pouvait les trouver dans un cabinet scientifique du XVIII<sup>e</sup> siècle. La seconde partie était consacrée plus spécifiquement à Volta. **Sur une table, quatre objets représentaient les étapes successives de sa carrière scientifique.** Un **électrophore**, nouveau générateur d'électricité dans lequel l'électrisation par influence est appliquée pour la première fois à la production systématique, abondante et durable d'électricité. Le **pistolet**, témoin des recherches de Volta sur les gaz naturels provenant des marais, autrement dit le méthane, peu utile comme arme, Volta le transforme en eudiomètre utilisé pour étudier la "respirabilité" de l'air, autrement dit le pourcentage d'oxygène contenu dans l'air. Extrêmement importants, les **électromètres** ont été mis au point par Volta afin de vérifier les concepts de capacité et de quantité qu'il propose. Pour la première



Pistolet de Volta - Musée des Arts et Métiers

fois il utilise le concept de tension électrique pour rendre compte des propriétés intensives de l'électricité et établit explicitement le lien existant entre charge, capacité et tension ( $Q=CU$ ). Le quatrième objet exposé est la **pile**, résultat des recherches de Volta peu convaincu par les théories de Galvani sur l'électricité animale et déterminé à prouver que le "moteur" de l'électricité est à chercher dans les métaux en contact et non dans les grenouilles qui ne sont que de simples détecteurs d'électricité.

Exposition esthétique, grâce à la beauté des objets en bois, de verre et de laiton, grâce à une scénographie très dépouillée où l'emporte la qualité du mobilier et de l'éclairage, Volt(a) est aussi une exposition didactique où est retracée une période extrêmement riche de l'histoire des sciences qui a abouti à une découverte majeure, la pile électrique. Connaître les origines de la pile, le milieu et les recherches qui ont permis sa découverte, c'est se réapproprier un peu de son histoire personnelle, la pile étant présente à tous les niveaux de notre vie.



Dans la grande salle de collection du Lycée, au lendemain des travaux de restauration de son mobilier (dessiné par l'architecte Martenot dans les années 1880), le retour de quelques instruments anciens d'électricité et d'acoustique.

## Une petite histoire de l'électricité, de l'Antiquité à Volta

### SOMMAIRE

Note : les photographies en couleur, sauf mention spéciale, sont celles d'instruments anciens des collections du Lycée. De même, les photographies de textes historiques ont été réalisées à partir d'ouvrages (*Journal des Savants* et *Encyclopédie de Diderot et D'Alembert*) appartenant au fonds de livres anciens.

Les origines	9
Gray et Dufay : deux pionniers	14
L'électricité - spectacle	16
Benjamin Franklin	20
Les premières lois mathématiques de l'électricité	25
Alessandro Volta entre en scène	30
"Des grenouilles de Galvani à la pile de Volta..."	31
La pile après Volta...et sans lui	35
Du "siècle de la curiosité" à l'ère de la "fée électricité"	39
Index chronologique	42
Dates repères	43
Bibliographie	44

## LES ORIGINES

### Longtemps, l'électricité se dissimule

Au 20<sup>ème</sup> siècle l'électricité est devenue omniprésente, le dire est un lieu commun.

Dans la vie quotidienne : la moindre panne révèle que nous ne savons plus vivre sans la "fée électricité". Dans notre compréhension de la nature : c'est la force électrique qui maintient les électrons en orbite autour du noyau de l'atome, c'est elle qui est responsable des combinaisons chimiques et de la cohésion de la matière. C'est elle qui est la cause ultime de toutes les forces - gravitation mise à part - qui gouvernent notre vie quotidienne : par exemple la tension d'un ressort ou la réaction d'un support résultent des forces électriques mises en jeu à l'échelle microscopique par la déformation infligée aux matériaux. Enfin la lumière est une "onde électromagnétique".

Et pourtant avant **Volta**, l'électricité se cache. **Jean-Pierre Maury**<sup>1</sup> écrit : "Si on excepte la foudre (...) les charges électriques parviennent remarquablement à dissimuler leur existence : jusqu'en 1600, leur seule manifestation reconnue est l'attraction des brins de paille par l'ambre frotté, dont il faut bien reconnaître que c'est un phénomène marginal (...)". Puis au 17<sup>ème</sup> et surtout au 18<sup>ème</sup> siècle apparaît dans les cabinets de physique un étrange arsenal de machines qui ne semble avoir alors d'autre usage - hors exciter la curiosité des savants - qu'étonner et amuser la bonne société.

C'est ce lent surgissement de l'électricité que nous allons évoquer, depuis l'Antiquité jusqu'à la fin du 18<sup>ème</sup> siècle. Puis nous relaterons la découverte de la "pile" par Volta. On comprendra alors le tournant de 1800 : pourquoi cet objet au prime abord si peu spectaculaire a été à l'origine d'une incroyable accélération des découvertes et des applications.

### Antiquité grecque : "elektron" et pierre de Magnésie

"Elektron" : ce mot grec désigne l'ambre. En frottant cette résine pour la polir, on constatait qu'elle attirait alors de petites brindilles. Par ailleurs, une pierre abondante dans une région d'Asie mineure alors nommée Magnésie attirait les objets en fer.

**Thalès**, 600 ans environ avant notre ère, considère

<sup>1</sup> Voir "bibliographie" : "petite histoire de la physique" p. 95

qu'ambre et pierre de Magnésie possèdent une "âme vivante" leur permettant d'agir à distance. Mais **Platon**, dans le *Timée*, refuse l'idée d'une "vertu attractive" s'exerçant à travers l'espace. Pour lui, il doit y avoir une "respiration", un mouvement de matière invisible, responsable de l'attraction.

**Expérience 1** : A défaut d'ambre, tout écolier sait qu'il peut attirer de petits bouts de papier à l'aide d'une règle de matière plastique frottée.

**Expérience 2** : Voici un échantillon de magnétite (oxyde de fer  $Fe_3O_4$ ). Cet aimant naturel peut attirer à distance de la limaille de fer ou des pointes d'acier



On constate que l'action de l'aimant n'est pas arrêtée par un écran de papier ou (ci-dessous avec un aimant artificiel) par une paroi de verre.



## Des débats pour 25 siècles

Action à distance sans support matériel ? Ou au contraire émission ou mouvement d'un "quelque chose" impalpable? Le débat va se poursuivre jusqu'au 20<sup>ème</sup> siècle et le "quelque chose" prendra des noms divers : effluves, tourbillons, éther, champ. L'action à distance a triomphé, mais son interprétation par la physique moderne suppose bien l'échange d'étranges "quelques choses".<sup>2</sup>

Autre débat qui n'a trouvé sa conclusion qu'à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle : faut-il distinguer l'"électricité" (associée à l'ambre frottée) et le "magnétisme" (associé à la pierre d'aimant) ? Les distinguer sera, nous allons le voir, un grand progrès. Mais c'est parce qu'au 19<sup>ème</sup> siècle on les a reliés que nous vivons à l'âge de l'électricité : **Oersted** découvre que les courants - c'est-à-dire des mouvements de charges électriques - produisent de l'aimantation, puis **Faraday** que des mouvements d'aimants peuvent faire naître des courants : de là l'alternateur de bicyclette ... ou celui d'une centrale électrique. Enfin **Maxwell** établit la théorie unifiée de "l'électromagnétisme" qui rend compte non seulement des phénomènes précédents mais aussi de l'existence et de la propagation des ondes électromagnétiques, dont la lumière est un cas particulier. Avant les remises en cause relativiste et quantique, l'édifice de la "physique classique" (gravitation et électromagnétisme, constitution atomique et moléculaire de la matière) semble alors, à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, magnifiquement achevé.

## La pierre d'aimant et la boussole

L'utilisation de la boussole pour s'orienter...et pour prédire l'avenir est avérée en Chine dès le 3<sup>ème</sup> siècle, sinon antérieurement. Elle sera adoptée par les navigateurs arabes, puis (déjà vers l'an mille ?) par les européens. Son usage devient primordial avec les grandes explorations.

Dans les collections du " Lycée de Rennes ", une merveilleuse "rose des vents" ...tout de même plus tardive (1744). La fleur de Lys pointe vers le Nord.



<sup>2</sup> Les "particules de matière" interagissent bien à distance ... moyennant l'échange de particules de champ "virtuelles" (dans le cas de l'interaction électrique ce sont des photons - "virtuels" c'est-à-dire qui ne peuvent être détectés tant que l'on ne perturbe pas le système en interaction).

Quand, après portugais et espagnols, les anglais partent à la conquête des océans à la fin du 15<sup>ème</sup> siècle, **William Gilbert** (1540 - 1603), médecin de la Cour et de la Marine, étudie ce "doigt de Dieu", comme il l'appelle. Il prône, en humaniste de la Renaissance, une "longue expérimentation", et c'est vers la fin de sa vie qu'il rédige son traité "De Magnete" ("De l'aimant").

**Pierre de Maricourt**, dès 1269, avait découvert l'existence et les propriétés de deux zones dites "pôles" Nord (N) et Sud (S) d'un aimant : deux N ou deux S se repoussent, un N et un S s'attirent. Il avait montré l'impossibilité d'obtenir un corps porteur d'un seul de ces pôles :

*Expérience 3, dite de L'aimant brisé : seules les deux extrémités (pôles N et S) d'une fine tige d'acier aimantée attirent la limaille. Cisillons cette tige dans la région centrale C. On constate que chaque fragment attire à son tour la limaille à ses deux extrémités : des pôles sont apparus en C. Un aimant NS a donné naissance à deux aimants NS' et N'S*

**Gilbert** cite ces résultats. Mais alors que pour ses prédécesseurs c'était le ciel qui orientait la boussole (d'où sa direction constante par rapport aux étoiles), Gilbert s'intéresse aux variations d'orientation de la boussole en divers lieux du globe terrestre et en déduit que c'est la Terre elle-même qui constitue un énorme aimant, responsable de cette orientation.

## Gilbert, le magnétisme et l'"électricité"

En même temps qu'il pousse beaucoup plus loin la connaissance du magnétisme Gilbert s'intéresse aux différences entre les propriétés de l'ambre frotté et de l'aimant.

L'aimant attire seulement le fer, tandis que l'ambre attire duvets, poussières, fils, ... Alors que le magnétisme est la propriété d'une seule substance, la magnétite, Gilbert découvre que non seulement l'ambre mais de nombreux matériaux (soufre, verre, diverses pierres précieuses et résines...) peuvent acquérir par frottement la propriété d'attirer des corps légers. Tandis que cette propriété n'apparaît qu'à la suite du frottement, l'aimant ne nécessite quant à lui aucune excitation. L'action de l'aimant, n'est pas arrêtée par un écran de papier ou de bois. L'expérience de l'aimant brisé n'a pas d'équivalent<sup>3</sup>.

Aussi Gilbert forge-t-il (en 1600), pour qualifier la force d'attraction liée au frottement, un mot nouveau : "électrique", en référence à l'ambre des grecs.

On lui doit aussi de nombreux progrès pratiques : matériel expérimental, liste de corps "électrisables" par frottement, et aussi liste de corps susceptibles d'être attirés par eux : ainsi aiguille ou feuille métalliques, eau ... viennent s'ajouter à ceux déjà connus.

*Attirer de l'eau ? Expérience 4 : Chez vous, frottez énergiquement une bouteille d'eau vide (en matière plastique), puis approchez-là d'un mince filet d'eau coulant d'un robinet. Vous verrez celui-ci dévier de la verticale, vers la bouteille.*

*Attirer une aiguille métallique ? Gilbert avait monté sur pivot une fine aiguille " de quelque métal que ce soit ". Si l'on approche un bâton électrisé d'une des extrémités, on voit pivoter l'aiguille dans sa direction. Expérience 5 : Réalisons l'expérience...avec une boussole. Le fait qu'elle soit aimantée ne joue ici aucun rôle : comme pour le papier, les brindilles ou duvets, nous verrons que l'attraction résulte d'un "électrisation par influence".*

Enfin, c'est aussi sur le plan de l'interprétation que William Gilbert introduit une distinction entre magnétisme et électricité. L'action magnétique, non stoppée par un écran, est une action à distance, immatérielle... et mystérieuse. L'action électrique, elle, proviendrait d'" effluves " émis par le corps frotté, et qu'un écran - selon lui - peut arrêter.

<sup>3</sup> L'existence des deux sortes de charges électriques ne sera connue que beaucoup plus tard, ce qui permettra de préciser cette affirmation. Un corps électrisé par frottement sera dit alors chargé soit positivement soit négativement. Des "dipôles" (une extrémité +, une autre -) peuvent exister mais ce n'est pas la règle, contrairement au cas du magnétisme.

## Aux 16<sup>ème</sup> et 17<sup>ème</sup> siècle, les grands projets d'interprétation de la nature

La naissance de Gilbert précède de 3 ans la mort de Nicolas Copernic et la publication de son fameux système du Monde, où Terre et planètes sont en orbite autour du soleil. La tentation est grande alors de rapprocher les attractions magnétiques et électriques de celle exercée par le soleil sur les planètes comme le fait par exemple **Johannes Kepler**<sup>4</sup> : pour lui, non seulement la terre, mais le soleil et les planètes sont comme des aimants.

Pour **Descartes**, tout s'explique par les mouvements d'une "matière subtile" (différente selon qu'il s'agit de l'attraction des astres ou des actions électriques ou magnétiques). Par exemple un flux de particules invisibles ("parties cannelées") sort d'un pôle d'aimant et rentre par l'autre. C'est parce que ces particules chassent l'air présent entre aimant et morceau de fer que ce dernier se trouve poussé, par l'air ambiant, vers l'aimant. Mais si l'air joue un tel rôle, une question devient cruciale :

L'attraction se propage-t-elle dans le vide ? Et d'abord, le vide existe-t-il ?

Au début du 17<sup>ème</sup> siècle la question suscite des polémiques acharnées. La réponse - positive - à cette dernière question sera obtenue par deux voies. Pour interpréter l'expérience de **Torricelli** (1643) il faut supposer qu'au-dessus du mercure de son tube règne le vide<sup>5</sup>. Une réponse plus pragmatique consiste à fabriquer du vide, ou du moins un air de plus en plus raréfié, par la construction de pompes pneumatiques. **Otto Von Guericke** (1602-1686), bourgmestre de Magdebourg et expérimentateur remarquable, non content de perfectionner le dispositif de Torricelli pour en faire un instrument de prédiction du temps, construit vers 1650 la première pompe à vide. Grâce à elle, il montre que la lumière, contrairement au son, se propage dans le vide. Un espace vide peut donc transmettre la lumière des astres.

C'est encore lui qui construit vers 1660 ce que nous pourrions être tenté rétrospectivement de considérer comme la première machine électrostatique à frottement.

Mais s'il a choisi le soufre (il a cassé le moule de verre qui eut été d'utilisation plus commode) auquel il a

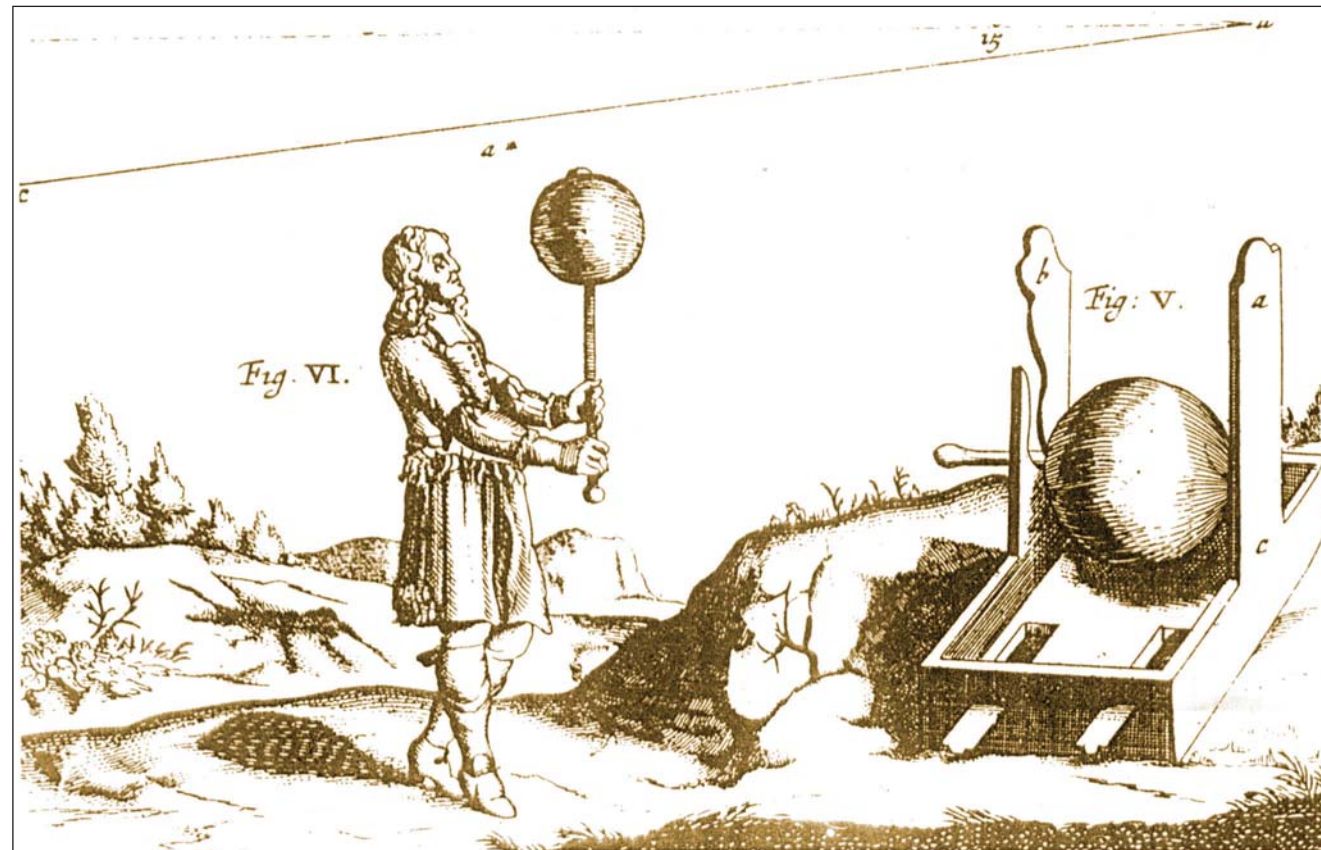
<sup>4</sup> Kepler a fait faire un progrès décisif à la théorie de Copernic, en reconnaissant le caractère elliptique des orbites. Lors de la publication du "De Magnete" il a 30 ans, et Galilée, l'autre grand copernicien, en a 37...

<sup>5</sup> Voir "quelques histoires de la pression atmosphérique et du vide" (Cahiers d'Amelycor n°1). Le tube de Torricelli est le prototype du baromètre. En effet, comme Blaise Pascal le prouva en 1648 par la célèbre expérience du Puy de Dôme, c'est la pression atmosphérique sur la surface du mercure de la cuve qui le fait monter plus ou moins haut dans le tube.

incorporé quelques minéraux, c'est qu'il cherche à réaliser non pas de nouvelles expériences d'électrisation, mais un modèle réduit de la Terre, dont il croit ainsi imiter la composition. Comme Gilbert et Kepler, Von Guericke croit à l'existence d'une force universelle, et il pense aussi que tous les pouvoirs ou "vertus" manifestés par les planètes ont leur siège dans les corps ordinaires.

l'électricité<sup>6</sup>. Et bien qu'il ait constaté le phénomène de répulsion à près contact avec le soufre frotté, on ne peut lui attribuer pour autant la découverte de la répulsion *électrique*. Il faudra donc que ses découvertes soient faites à nouveau par d'autres, dans le cadre de recherches systématiques sur les phénomènes électriques.

A Londres **Robert Boyle** (1627-1691) perfectionne la



C'est un simple globe de soufre " de la grosseur d'une tête d'enfant " enfilé sur un axe. On peut ainsi le faire tourner tandis qu'on le frotte avec la main ou un chiffon de drap, puis s'en servir ensuite en tenant l'axe à la main. Otto von Guericke. *Experimenta Nova*, Magdebourg, 1672. w

Et son globe, une fois excité par frottement, semble en effet reproduire en miniature la plupart des "vertus" qu'il attribue à la Terre. Il attire de petits objets, simulant ainsi la gravitation. Une plume, d'abord attirée puis repoussée après contact, reste en suspension et l'accompagne ensuite dans son mouvement de rotation comme la lune accompagne la terre. Enfin, le frottement provoque chaleur, crépitements et émission de lueurs visibles dans l'obscurité.

Otto Von Guericke pense avoir montré le lien entre gravité et électricité. Mais pour lui seule cette "vertu attractive" est de nature électrique. Il constate qu'un fil peut la transmettre : c'est la conduction électrique que Stephen Gray redécouvrira de façon plus générale. En ce qui concerne les autres phénomènes observés et notamment les émissions lumineuses et sonores, Von Guericke les distingue de

pompe pneumatique, et c'est lui qui pourra montrer ainsi expérimentalement que les actions électriques et magnétiques persistent dans le vide (ce que certains contestent cependant : si peu que ce soit, il reste de l'air). Tant pis pour Descartes !

<sup>6</sup> L'hypothèse d'un lien entre la foudre et les phénomènes d'électrisation sera donc à fortiori plus tardive. Cela peut nous étonner. Dans notre vie quotidienne l'expérience des "châtaignes" électrostatiques est courante : il arrive lorsqu'on se peigne par temps sec que de petites étincelles se traduisent par des crépitements, ou, lorsqu'on se déshabille, que des effets électriques importants se manifestent au point que la lumière des étincelles soit visible dans l'obscurité. Il est vrai que les sous vêtements en rilsan ou autres textiles synthétiques, facilement électrisables par frottement, étaient inconnus autrefois et qu'on n'avait apparemment pas noté d'étincelles produites par le frottement de l'ambre.

## Machines d'Hauksbee et lueurs électriques

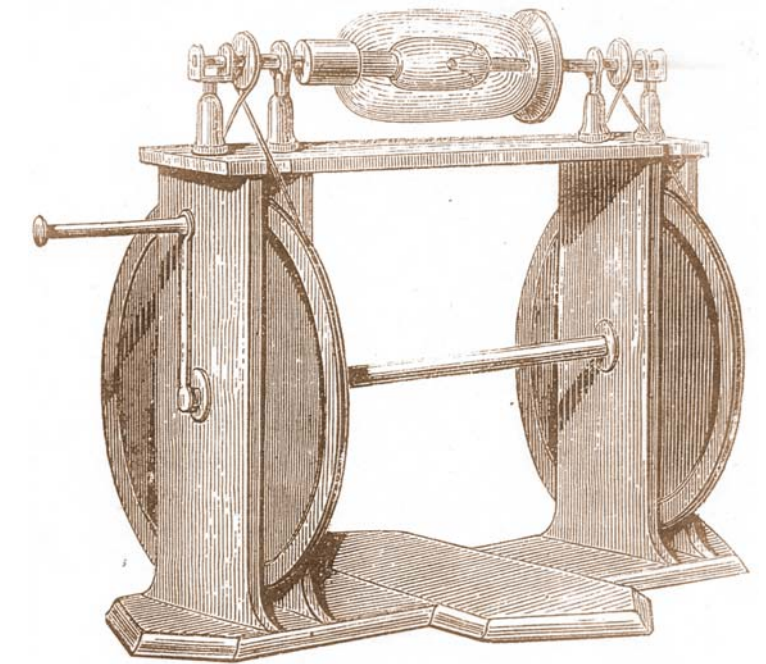
Force est de constater qu'après la découverte par Gilbert de la généralité des propriétés initialement attribuées à l'ambre, le 17<sup>ème</sup> siècle n'a guère apporté de nouvelles connaissances dans le domaine électrique. C'est le 18<sup>ème</sup> siècle, "siècle de la curiosité", qui sera celui des découvertes majeures.

Les années 1660-1670 ont vu la création des grandes Sociétés Savantes en Europe : Académie des Sciences à Paris, Royal Society à Londres, etc. Cela va de pair avec des moyens matériels plus importants, des rencontres, des publications. Quelques physiciens à plein temps apparaissent.

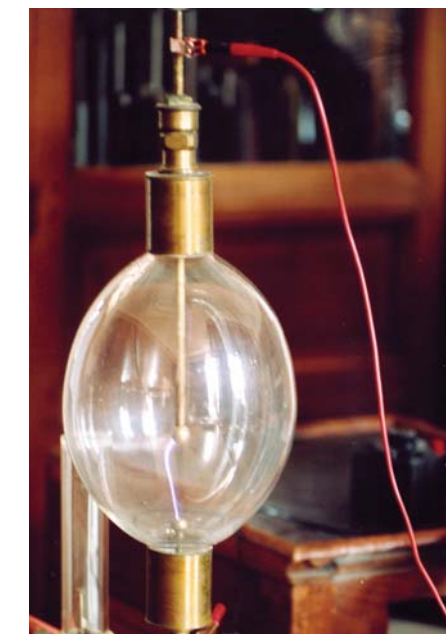
C'est ainsi que la Royal Society, sous la présidence d'**Isaac Newton**, crée en 1703 un poste de démonstrateur, qui est attribué à **Francis Hauksbee** (1666 ?-1713). C'est lui qui va construire les premières véritables machines électriques à frottement. Avant lui on avait constaté, lorsqu'on secouait dans l'obscurité un baromètre à mercure, que de mystérieuses lueurs bleutées apparaissaient dans l'espace vide au-dessus du mercure. Il pense à un effet lié au frottement du mercure contre le verre, et obtient en effet les mêmes lueurs en frottant simplement l'extérieur du tube barométrique avec ses mains. Il imagine alors d'améliorer le dispositif en se passant du mercure et en entraînant en rotation rapide une boule de verre dans laquelle il a fait le vide, tandis qu'une main produit le frottement. Des lueurs bleutées apparaissent à l'intérieur, tandis que la boule attire les objets légers de son voisinage, à la manière de l'ambre, mais beau-

coup plus fortement. La simultanéité des deux phénomènes met en évidence, pour Hauksbee, la nature électrique du phénomène lumineux.

Sans le savoir il inaugurerait l'étude de la décharge électrique dans les gaz raréfiés (plus facile à obtenir que dans l'air à pression normale).



Une des machines de Hauksbee : deux cylindres de verre coaxiaux peuvent être mis en mouvement de rotation rapide indépendamment par chacune des roues. Des décharges électriques peuvent apparaître entre les deux cylindres. J.Priesley, *histoire de l'électricité*, 1771.



Cet "œuf électrique" est un des dispositifs qui permettront plus tard de systématiser cette étude. En reliant "l'œuf" à une pompe à vide et en connectant ses deux électrodes aux pôles d'une machine électrique, on observe la décharge électrique dans l'air raréfié.

## Gray et Dufay : deux pionniers

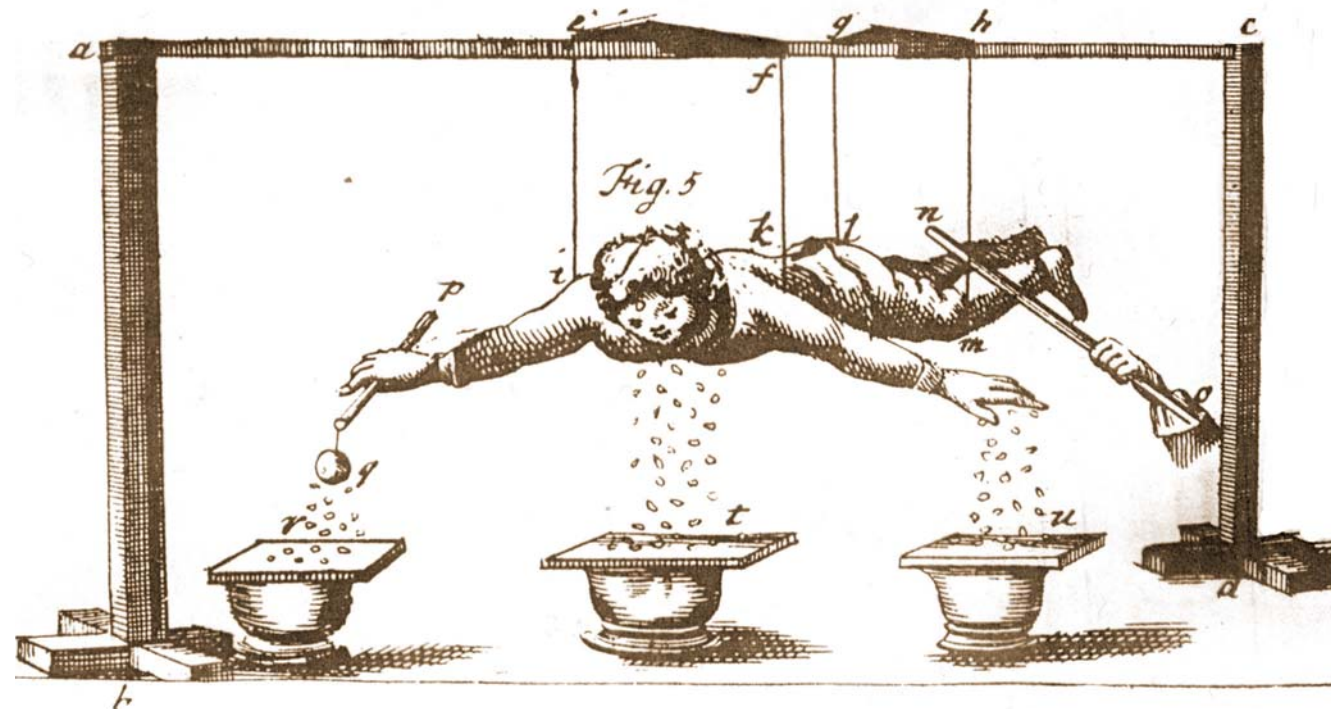
### Gray : conducteurs et isolants

**Stephen Gray** (1666-1736), teinturier, s'intéresse aux séances de la Royal Society et se lance à son tour dans l'expérimentation. Alors qu'il veut trouver de nouveaux "corps électriques", le hasard allié à la curiosité l'amène, en 1729, à découvrir d'abord la transmission de la "vertu électrique".

Pour éviter que la poussière ne pénètre dans le long tube de verre qu'il électrisait par frottement, il utilise des bouchons de liège... et voilà que le liège qui n'a pourtant pas été frotté attire à son tour de petits objets. Et s'il plante dans le liège un roseau ou une baguette ces derniers acquièrent à leur tour la même propriété ! Il continue en laissant pendre par la fenêtre ficelle de chanvre ou fil métallique long d'une dizaine de mètres. Enfin, pour réaliser l'expérience à l'horizontale, il

suspend au plafond d'une galerie, par des fils de soie comme le lui suggère son ami Wheler, une corde de chanvre d'une centaine de mètres terminée par une boule d'ivoire. Le pouvoir d'attraction est encore transmis du tube de verre électrisé à la boule ! Mais la suspension ayant cédé, Gray et Wheler remplacent les fils de soie par des fils de laiton. Plus rien ! "[Lorsque l'effluve électrique] arrivait aux fils de suspension, il passait par ces fils aux poutres et ainsi n'allait pas plus loin sur la ligne qui devait le conduire à la boule d'ivoire". Des essais répétés permettent de conclure : bois, roseau, chanvre, métaux sont des conducteurs, verre, résines, soie sont des isolants<sup>7</sup>.

Ces derniers ne transmettent pas l'électrisation, qu'ils conservent à leur surface dans la région qui a été frottée.



Le corps humain est conducteur : Gray en fait la démonstration en suspendant par des fils de soie un enfant dont les jambes sont mises en contact avec le tube de verre frotté ! *Doppelmayr, 1774.*

<sup>7</sup> Gray n'utilise pas encore ces termes (le mot "conducteur" est introduit, vers 1740, par Desaguliers). Et l'on saura plus tard que des "conducteurs" comme le chanvre ou les roseaux seraient, s'ils étaient parfaitement secs, des isolants.

### Dufay, la répulsion électrique et les deux électricités

**Charles-François de Cisternay Dufay** (1698-1739) est adjoint chimiste à l'Académie Royale des Sciences dès 25 ans, et directeur à 35 ans. A partir de 1732 il devient intendant des jardins du Roi, charge qu'occupera ensuite Buffon. Lorsqu'il reçoit les mémoires de la Royal Society, il cherche à étendre et systématiser les observations de Gray. Il découvre que tous les corps peuvent être électrisés: si certains comme les métaux ne peuvent pas être électrisés de façon sensible par frottement, ils peuvent l'être considérablement par contact, à condition d'être tenus par un manche isolant.

**Expérience 6** : électrisation d'une tige de cuivre tenue par un manche isolant.

On voit sur la photographie des tiges ou barreaux de cuivre à manche isolant et d'autres dispositifs conçus ultérieurement, où des pièces métalliques destinées à être électrisées sont isolées par un manche ou un support : tourniquet électrique, pendule électrostatique, excitateur à manche de verre.



Dufay découvre aussi que l'action électrique peut être répulsive. Le corps qui subit une attraction de la part d'un objet électrisé est repoussé après contact avec cet objet<sup>8</sup>. L'observation n'est pas nouvelle, mais on n'y avait guère prêté attention, y voyant par exemple un simple rebond. Mais pour Dufay, il y a lors du contact

"communication" d'électricité d'un corps à l'autre. Une fois électrisés tous deux, ils se repoussent.

Principes de Dufay : *les corps électrisés attirent ceux qui ne le sont pas. Ils repoussent ceux qui sont venus s'électriser à leur contact.*

Mais qu'arrive-t-il si l'on met en présence deux corps électrisés par contact avec deux sources différentes ? Dufay électrise une feuille d'or par contact avec un tube de verre frotté. Repoussée alors, elle s'élève en l'air. Puis il en approche un morceau de gomme copal (résine d'arbre exotique) électrisé par frottement : "la feuille fut s'y appliquer sur le champ (...). J'avoue que je m'attendais à un résultat tout contraire parce que, selon mon raisonnement, le copal qui était électrique devait repousser la feuille qui l'était aussi". Même chose avec l'ambre... Mais s'il utilise du cristal de roche, la feuille est repoussée comme par le tube de verre ! "En sorte que la feuille repoussée par les uns (...) était attirée par les autres ; cela me fit penser qu'il y avait peut-être deux genres d'électricité différents". Celle du verre, du cristal de roche, des pierres précieuses, du poil des animaux... et celle des résines, ambre, gomme copal ou gomme laque, soie, fil, etc.

Principes de Dufay : *"il y a deux sortes d'électricité (...) l'une que j'appelle électricité vitrée, et l'autre électricité résineuse. Le caractère de ces deux électricités est de se repousser elles-mêmes et de s'attirer l'une l'autre. Ainsi un corps de l'électricité vitrée repousse tous les autres corps qui possèdent l'électricité vitrée, et au contraire il attire tous ceux de l'électricité résineuse."*

Dufay est aussi l'inventeur d'un électroscope rudimentaire, utilisant les propriétés de répulsion mutuelle entre électricités de même espèce pour mettre en évidence et évaluer l'électrisation d'un corps. C'est l'ancêtre des classiques électroscopes à feuilles d'or ou d'étain. La portée des découvertes de Dufay (publiées dans une série de mémoires en 1733) est immense et pourtant, regrettera **Henri Becquerel** en 1893: "j'ai vainement cherché son souvenir dans les livres de physique, dans le nom des lois et des unités électriques ..."<sup>9</sup>.

<sup>8</sup> C'est loin d'être évident lors des expériences que réalise le malheureux professeur devant des élèves : le petit bout de papier attiré par la règle frottée peut y rester collé assez longtemps ! Cela peut s'expliquer par le caractère isolant du papier, auquel la règle a donc du mal à communiquer son électrisation. Plus généralement les expériences de cours d'électrostatique "ratent" très souvent, bien que le professeur ait la chance de savoir ce qu'il veut trouver ! On imagine le génie expérimental et la finesse de la réflexion qu'il a fallu aux pionniers pour isoler les faits majeurs de toutes les complications qui venaient les masquer.

<sup>9</sup> J'emprunte cette citation à Gérard Borvon. Dans l'article cité en bibliographie, il rend magnifiquement justice à Dufay, et suggère que nos cours sortent de l'anonymat les lois des attractions et répulsions électriques : les "lois de Dufay".

# L'électricité - spectacle

## L'abbé Nollet fait des étincelles

Pour étudier l'effet de l'électricité sur le corps humain Dufay se suspend lui-même à des fils isolants. Son assistant, l'abbé Nollet (1700-1770), l'électrise en le touchant avec un tube de verre frotté, et Dufay ressent le "vent" électrique qui hérissé les poils de sa peau (électrisés par une même sorte d'électricité, comme le reste du corps, ils subissent des forces répulsives).



Version "Espace des Sciences" de l'horripilation de Dufay : toutefois la personne dont les cheveux se dressent n'est pas suspendue, mais debout sur un plateau isolant ! La tension est de 80 000 volts.  
Photo Espace des Sciences Rennes

Mais l'étonnement surgit quand une forte étincelle jaillit entre le doigt de Nollet et la jambe de Dufay suspendu. C'est le début d'une grande "mode électrique" qui dépasse largement le monde savant.

Des allemands perfectionnent la machine de Hauksbee : une roue met la boule ou le tube de verre en rotation rapide, et c'est un coussin de cuir plutôt que la main qui produit le frottement. Par des rubans métalliques l'électricité produite sur la surface de la boule est transmise à une tige métallique (ou canon de fusil) qui sera le pôle unique de cette machine. Le "feu électrique" tiré de la tige, ou mieux du doigt d'un expérimentateur installé sur un support isolant, peut enflammer l'alcool contenu dans une cuillère ; l'étincelle peut aussi jaillir entre la pointe d'une épée et l'eau placée dans un bol. Parmi les nombreux divertissements proposés au public par un professeur de physique de Wittenberg, il y a le "baiser électrique" entre une femme placée sur le plateau isolant et un homme debout sur le sol ... Il paraît que la secousse est intense...

A Londres, on ne veut pas être en reste : "les femmes

de notre pays présenteront autant de feu dans leurs lèvres et leurs yeux que n'importe quelle autre en Allemagne".

A Paris, Nollet construit sa propre machine. Et il publie en 1746 une théorie des "affluences" et "effluences" dans le plus pur style spéculatif cartésien. Il y conteste Dufay : la distinction "vitreuse - résineuse" n'est selon lui qu'une apparence due à des différences de force entre "matières affluentes ou effluentes" mises en circuit par verre et résine. De fait cette physique qualitative permet toujours de donner une explication aux phénomènes ... après coup, mais non de prévoir des résultats d'expérience. Il reste que Nollet est un remarquable démonstrateur d'expériences et propagandiste de la science, le père, écrira Diderot, de la "philosophie expérimentale".

### Les remarques de l'abbé Nollet sont encore pertinentes !

*"M. l'Abbé Nollet remarque avec raison que si la Physique était plus & plutôt connue, on ne verroit point tant de personnes, qui, malgré beaucoup d'esprit, & une bonne éducation d'ailleurs, donnent dans toutes les erreurs populaires, dans les craintes les plus ridicules, dans le faux merveilleux, toujours prêts à être la duppe de toutes les charlataneries, dont on voudra se servir pour les tromper".*  
(Journal des Sçavans)

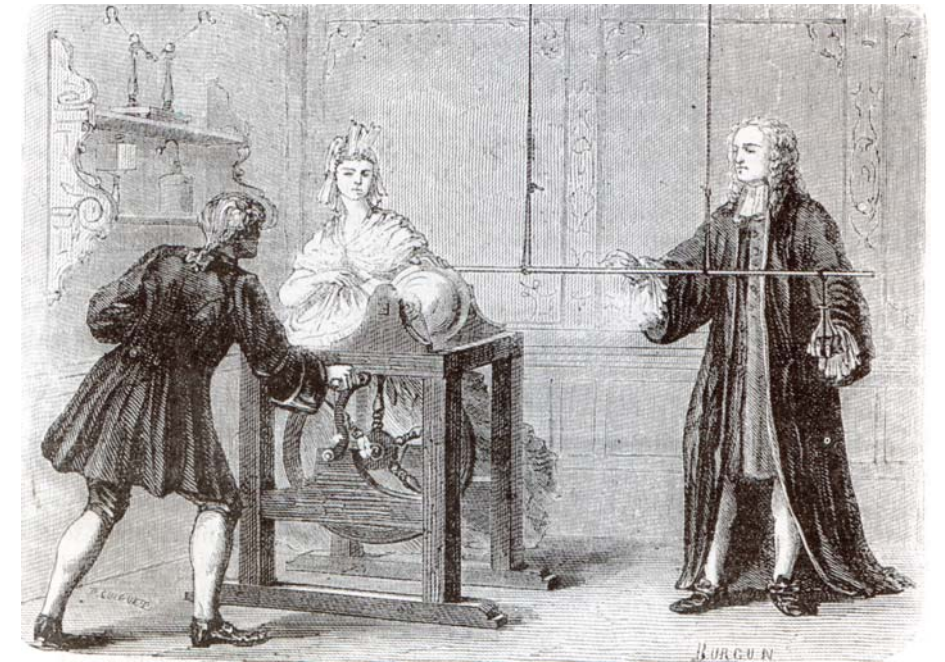
L'enthousiasme du public ne connaîtra plus de bornes après une "expérience terrible" :

### La bouteille de Leyde.

On sait électriser l'eau : il suffit d'y plonger la tige métallique reliée à la machine électrique, le récipient contenant l'eau étant posé sur un plateau isolant.

Mais deux amateurs, un chanoine de Poméranie et un magistrat de Leyde, ont la malencontreuse idée d'électriser l'eau d'une bouteille tenue à la main. Tout va bien jusqu'à ce que l'autre main s'approche, pour la retirer, de la tige plongée dans l'eau. La secousse est terrible, sans commune mesure avec la petite décharge reçue "normalement" en approchant la main de la tige. **Pieter Van Musschoenbroek** (1692-1761), professeur de physique à l'université de Leyde, reproduit l'expérience, et au printemps 1746 en communique les résultats au naturaliste **Réaumur** :

*"tout à coup ma main droite fut frappée avec tant de violence que j'eus tout le corps ébranlé comme d'un coup de foudre (...); en un mot je croyais que c'en était fait de moi".*



On voit ici l'expérimentateur tenant la bouteille fatidique où plonge une tige métallique reliée à la machine électrique par la longue barre horizontale, tandis que son autre main s'approche dangereusement de cette barre !

La "bouteille de Leyde" a donc accumulé, "condensé", de l'électricité : elle est le prototype de ce qu'on appellera bientôt des condensateurs. Elle sera vite perfectionnée : au lieu de l'eau, du métal froissé conduit l'électricité à une feuille d'étain collée sur la face intérieure du verre, et la main est remplacée par une autre feuille collée sur la face externe. Puis on s'apercevra que deux "armatures" métalliques planes séparées par un simple carreau de verre font aussi bien l'affaire.



Verre et bouteilles de Leyde, Batterie de bouteilles de Leyde. Le modèle ci-dessous est un électromètre rudimentaire : la distance entre les deux boules est réglable, et la longueur de l'étincelle qui peut éclater entre elles renseigne sur la quantité d'électricité accumulée.

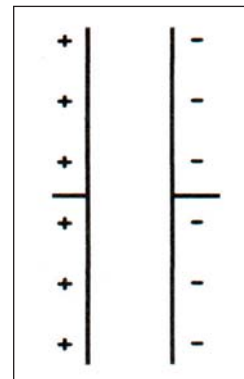


**Expérience 7 :** On tourne la manivelle d'une machine de Wimshurst (commode, mais anachronique par rapport à ce récit puisque mise au point en 1883 seulement) jusqu'à ce qu'entre ses deux pôles claquent des étincelles. On commence sans coupler la machine aux deux bouteilles de Leyde prévues par le constructeur, puis on établit le couplage

On constate que les étincelles se succèdent à une fréquence bien moindre dans le second cas mais qu'elles sont alors beaucoup plus brillantes et sonores.

En termes modernes on dira que pour une même tension électrique (mettons 30000 volts pour pouvoir provoquer une étincelle sur la distance séparant les deux pôles) on a accumulé grâce aux bouteilles une quantité d'électricité très supérieure : il a donc fallu faire fonctionner la machine plus longtemps entre deux décharges, mais ces dernières véhiculent une intensité électrique beaucoup plus forte.

faible distance d'une seconde armature métallique (schéma ci-contre), cela aura pour résultat de faire fuir les charges négatives de cette dernière le plus loin possible, laissant du coup en regard de la première armature des charges positives. L'attraction mutuelle entre charges négatives de la première armature et positives de la seconde aide donc à leur accumulation, et l'on devine que l'effet sera d'autant plus important que les deux armatures seront séparées par une plus faible épaisseur d'isolant...



### La cour et les moines s'envoient en l'air

L'abbé Nollet n'est plus l'assistant de Dufay mais construit des instruments pour le cabinet de Réaumur lorsque ce dernier reçoit la lettre de Van Musschoenbroek. Déjà célèbre par son cours public, pour lequel il dispose de 350 appareils de démonstration, l'abbé s'empresse de reproduire l'expérience. La bouteille "de Leyde" comme il la baptise permet non seulement d'accumuler mais aussi de conserver l'électricité plusieurs jours après son contact avec la machine.

**Expérience 8 :** Contentons-nous de le vérifier pour une durée plus brève. Quelques minutes après avoir chargé une de nos batteries, on peut encore en soutirer une étincelle à l'aide d'un "excitateur" (à moins qu'il n'y ait dans le public des volontaires pour la "terrible expérience").

Dès lors, comme le dit Nollet "l'électricité va se donner en spectacle au peuple"... et à la cour. Il est du dernier chic d'éprouver la mortelle - enfin presque ! - secousse : ainsi dans la galerie des glaces, devant Louis XV, Nollet fait sauter en l'air 180 gardes royaux, et avec les chartreux d'un couvent parisien la chaîne s'allongera jusqu'à 1,5 km !

La machine électrique se perfectionne encore : à la fin du 18<sup>ème</sup> siècle la boule de verre est remplacée par un disque, par exemple dans la machine de **Ramsden** (vers 1766)<sup>11</sup>. En 1785 la machine de **Martinus Van Marum**<sup>12</sup>, avec un disque de 1,6 mètre de diamètre, produit des étincelles longues de 60 cm et peut tuer des veaux avec une seule décharge !

### L'Abbé Nollet et la bouteille de Leyde (Journal des Sçavans, avril 1746, p. 254-255)

"Le Mercredi 20 Avril, jour auquel l'Académie Royale des Sciences fit sa rentrée, M. l'Abbé Nollet lut un mémoire sur l'Electricité, matière fort à la mode présentement..."

Parmi les merveilleux Phénomènes de l'Electricité, dont le nombre s'accroît tous les jours, & qu'on admire avec tant de raison ; il n'y en a point qui ait paru plus intéressant, & plus prêt à trouver quelque application utile, que cette singulière & étonnante commotion que l'on ressent dans les bras, & souvent même dans tout le corps, lorsque tenant d'une main un vase de verre en partie plein d'eau, on excite avec l'autre main, une étincelle de cette même verge qui conduit l'Electricité au vase. M. L'Abbé Nollet, instruit de ce fait par des Lettres de Messieurs Muschenbroek et Allaman, tous deux établis à Leyde, non seulement l'a répété pour lui & pour un grand nombre de personnes qui fréquentent son école" ...

"Notre Académicien ... fait partager (cet effet) à plusieurs personnes en même temps". La secousse administrée aux expérimentateurs a de quoi intimider. "Cette secousse effrayante ... qu'il ne seroit pas prudent de faire ressentir dans toute sa force à des tempéraments délicats, ou à des personnes dont l'état exigeroit du ménagement".

(...) "Deux cents hommes qui se tenoient par la main, lui ont appris par une exclamation générale & simultanée, que le coup n'est point porté par une matière, qui se meuve progressivement ; mais bien plus vraisemblablement par un fluide subtil, qui est comprimé & qui transmet subitement son action à tout ce qui le renferme".

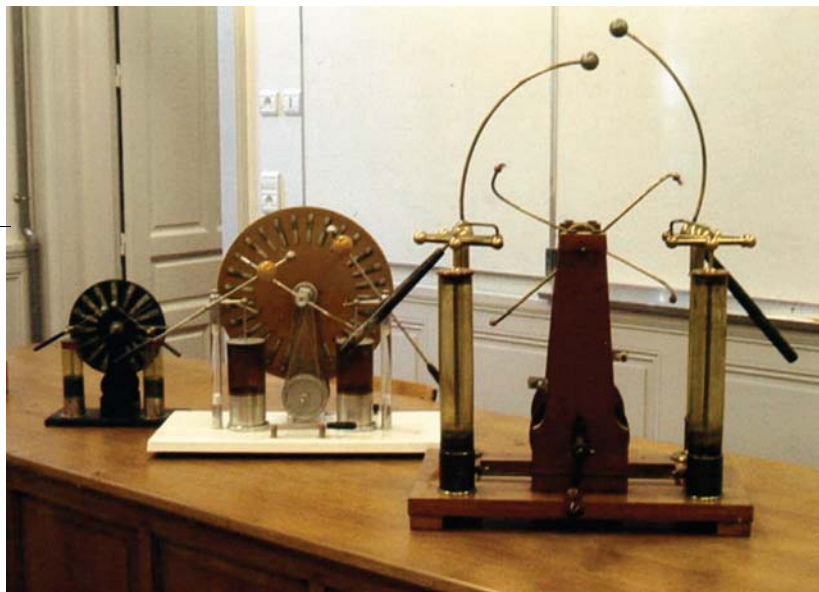
### Circuit électrique et vitesse de l'électricité :

Les chaînes humaines sont un intéressant dispositif expérimental ! D'une part elles mettent en lumière une idée qui sera théorisée par un précurseur de Franklin, **W. Watson** : "la force électrique décrit toujours un circuit" (il faut une chaîne ininterrompue pour conduire le "feu électrique"). D'autre part la propagation de la décharge semble instantanée : quelle que soit leur place dans la chaîne humaine reliant les deux armatures, tous sursautent au même instant. **Le Monnier** tente cependant en 1746 une mesure de vitesse en utilisant un fil de fer de plusieurs kilomètres, mais la durée de propagation est bien trop courte pour être chronométrée avec les moyens de l'époque, et il peut seulement conclure à une vitesse au moins trente fois supérieure à celle du son (on saura beaucoup plus tard qu'elle est identique à la vitesse de la lumière).

<sup>11</sup> Encore " la plus ordinairement employée " vers 1880.

<sup>12</sup> Elle est présentée actuellement dans un musée de Harlem.

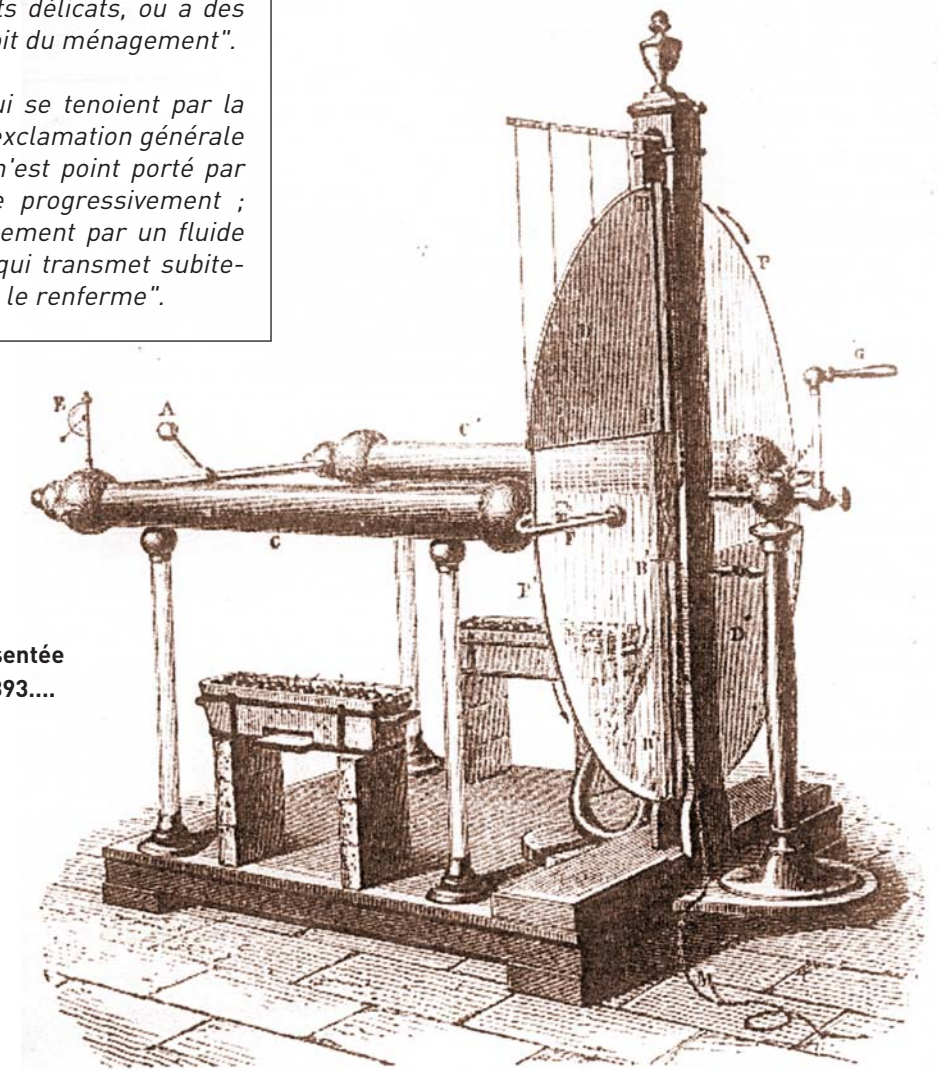
<sup>13</sup> Drion et Fernet, Ganot : manuels anciens d'enseignement, voir bibliographie



Machine de Wimshurst ancienne (privée de ses disques) et machines plus récentes : on remarque les deux sphères métalliques constituant les pôles, et les "bouteilles de Leyde" (cylindres verticaux situés sur les côtés droit et gauche de chaque machine)

Le pauvre Van Musschoenbroek ne comprend rien à sa mésaventure, et pourtant les récentes découvertes de Dufay auraient pu l'aider. En effet<sup>10</sup> : si l'on veut électriser une armature solitaire, il sera difficile d'y accumuler une grande quantité de charges électriques d'une même espèce - par exemple négatives - du fait de leur répulsion mutuelle. Mais si on l'approche à très

<sup>10</sup> Pour simplifier nous utiliserons le langage actuel (celui dû à Benjamin Franklin) faisant correspondre à l'électricité "vitrée" des charges positives et à la "résineuse" des charges négatives.



La machine de Ramsden représentée dans le "Drion & Fernet"<sup>13</sup>, ed. 1893....

# Benjamin Franklin

## "L'algèbre électrique"

En 1746, la société savante de Philadelphie reçoit d'un membre de la Royal Society un colis comportant un tube de verre entraîné par une manivelle et une bouteille de Leyde, avec mode d'emploi. Cette société savante est alors menée par **Benjamin Franklin** (1706-1790). Cet autodidacte, d'abord artisan imprimeur, puis éditeur, homme d'affaires et homme politique, s'y consacre alors à des loisirs savants.

Le voilà passionné d'électricité et bientôt plus de 200 tubes sont vendus à Philadelphie tandis que de part et d'autre de l'Atlantique, s'échangent des descriptions de nouvelles expériences amusantes.

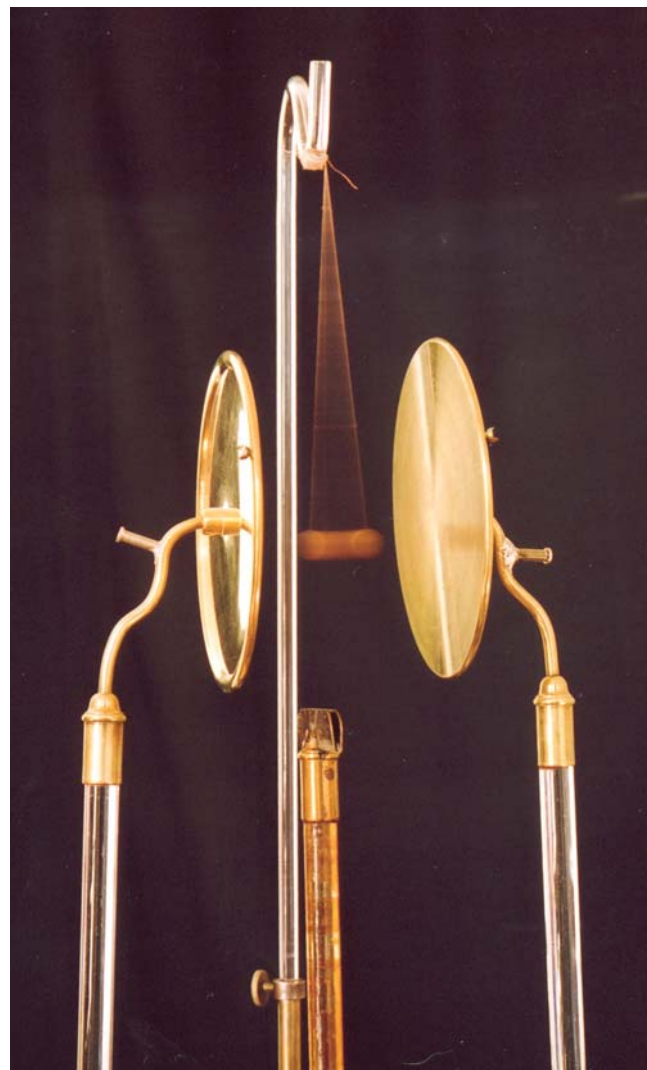
Mais surtout, Benjamin Franklin est l'inventeur d'une véritable "algèbre électrique". Son expérience de comptable l'avait déjà amené à tenter d'algébriser plaisirs et souffrances, en évaluant les uns comme recettes, avec le signe plus, les autres comme pertes, avec le signe moins ! Il fait l'hypothèse d'un fluide électrique unique, que la matière ordinaire absorbe à la manière d'une éponge. Si un corps en gagne au-delà de son contenu normal, ce fluide se porte sur sa surface et ce corps est électrisé positivement ; s'il en perd, il est électrisé négativement. L'électricité ne se crée ni ne se perd, mais passe d'un corps où elle est en excès à celui qui en manque. De très astucieuses expériences viennent appuyer ce point de vue.

Franklin fait l'hypothèse que l'électricité "vitrée" de Dufay correspond à une électrisation positive et la "résineuse" à une électrisation négative. (Cette hypothèse largement arbitraire conduira plus tard à attribuer la charge négative à l'électron ; l'électricité "résineuse" correspond donc à un excédent d'électrons et non à un déficit de "fluide", et ce sont des électrons - et non un fluide positif - qui sont transférés d'un corps à l'autre lors des expériences d'électrisation.)

Les machines ou autres dispositifs d'électrisation ne créent pas mais déplacent simplement le "fluide électrique" : par exemple le verre frotté par du drap reçoit de ce dernier du fluide électrique, ce qui le rend positif, tandis que le drap devient négatif puisqu'il a perdu du fluide. (Si on les tient par l'intermédiaire d'un isolant, il est en effet facile de constater que les tissus, fourrures, etc. utilisés pour électriser les corps frottés, se retrouvent électrisés eux-mêmes avec une charge électrique opposée.)

Implicitement, les conceptions de Benjamin Franklin sont plus proches de l'idée d'action à distance que de

la théorie dominante des "effluves". Il imagine que les particules du fluide électrique (les +) se repoussent entre elles, mais sont attirées par les corps déficitaires en fluide (les -). Il reconnaît toutefois une faiblesse : il lui est difficile d'expliquer ainsi la répulsion entre les "moins". Et Nollet et les autres partisans européens des "effluves" résistent vigoureusement aux thèses de l'américain...



**L'expérience 9** dite du "carillon électrique" est une belle illustration des lois de Dufay et des hypothèses de Franklin. Notre "carillon électrique" est constitué de deux plateaux de laiton portés par des supports isolants. Chacun des plateaux peut être relié à l'une des bornes d'une machine électrostatique. Entre les deux plateaux est suspendue par un fil isolant la boule d'une pendule électrostatique.

Notre machine de Wimshurst est isolée et initialement non chargée. En la faisant fonctionner on crée donc un excès d'électricité positive + Q sur un de ses pôles, exactement compensé (Franklin) par le déficit - Q créé sur l'autre pôle.

Lorsque la boule du pendule rencontre le plateau relié au pôle positif, elle prend une partie de la charge positive et se trouve alors (Dufay) repoussée par ce plateau et attirée par l'autre. Au contact de ce dernier qui est déficitaire en "fluide électrique", elle lui en cède (Franklin) et devient elle-même négative. Elle est donc repoussée (Dufay) et repart vers le plateau positif. Ainsi de suite jusqu'à l'arrêt du carillon. On constate alors que les deux plateaux sont simultanément déchargés : le fluide en excès d'un des pôles a été petit à petit transféré par les allées et venues de la boule au pôle déficitaire, compensant exactement ce déficit (Franklin) :  $+Q + (-Q) = 0$

Reste à corriger ce qui précède à la lumière des connaissances modernes : au lieu que la boule du pendule transfère du "fluide" positif du premier au second plateau, elle transporte au contraire des électrons du second (négatif, excédentaire en électrons) au premier (positif, déficitaire en électrons).

## Les théories ultérieures sur la nature de l'électricité :

**Robert Symmer** (1707-1763), physicien écossais, en tient pour deux fluides électriques, mais il garde le vocabulaire de Franklin (fluide positif et fluide négatif) de préférence à celui de Dufay. L'application à ces deux "fluides" des principes de Dufay évite la difficulté rencontrée par Franklin, tout en expliquant aussi bien que Franklin l'attraction subie par les corps non électrisés ("électrisation par influence" : voir ci-dessous). La théorie de Symmer sera largement enseignée dans les manuels d'électricité du 19<sup>ème</sup> siècle<sup>14</sup>, au point que les effets lumineux et calorifiques des décharges ou des courants électriques y seront parfois interprétés comme résultant de la rencontre impétueuse ou "recomposition" des deux fluides circulant en sens inverse<sup>15</sup>.

Il faudra attendre la découverte de l'électron par **J.J. Thomson** en 1897 pour que s'impose au 20<sup>ème</sup> siècle la

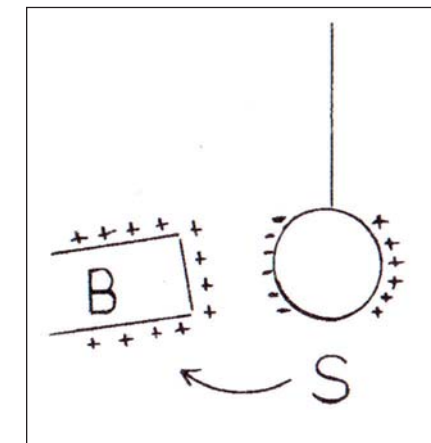
<sup>14</sup> Notre édition (1880 ?) du célèbre traité de Ganot, marque sa préférence pour cette théorie tout en précisant : "on ne connaît point la nature de cet agent [l'électricité]", tandis que la version de 1893 du traité de Drion et Fernet cite exclusivement cette hypothèse ; enfin la 23<sup>ème</sup> édition du Ganot (Ganot & Maneuvrier, vers 1905) évite prudemment la notion de fluide, ne fait aucune allusion à l'électron, et après avoir précisé "nous ignorons la vraie nature de l'électricité" utilise de façon purement opératoire les seules notions d'électricités (ou charges) positive et négative et de courant électrique.

<sup>15</sup> Cela reste souvent la représentation intuitive des élèves de collèges qui imaginent, dans l'ampoule électrique, la rencontre d'une électricité issue du "plus" de la pile et d'une autre venue du "moins".

conception moderne : existence de particules porteuses de charge électrique ; le courant n'est pas l'écoulement d'un ou deux fluides mais un mouvement collectif d'électrons dans les métaux, d'ions dans les solutions conductrices.

## La compréhension de "l'électrisation par influence"

Nous avons anticipé, plus haut, en interprétant la condensation d'électricité dans la bouteille de Leyde. En effet Benjamin Franklin est le premier à avoir donné cette explication, qui débouche sur toute la théorie de "l'influence électrique". C'est cette influence qui explique notamment l'attraction subie par les corps non électrisés. Approchons par exemple une baguette B électrisée positivement de la petite boule S, métallisée en surface, d'un "pendule électrostatique". La boule est suspendue à un fil isolant, donc si elle est initialement neutre elle le reste tant qu'elle n'est pas en contact avec la baguette.



Mais la distribution de la charge électrique est influencée par B : le métal étant conducteur, le "fluide électrique" (positif selon Franklin) de S est repoussé du côté opposé à B. Dans l'interprétation moderne, ce sont au contraire des électrons qui ont afflué du côté de B. Le résultat est identique : une charge négative apparaît du côté de S le plus proche de B, et une charge positive de même grandeur du côté opposé. On peut comprendre alors que la force attractive subie de la part de B par la région négative l'emporte sur la force répulsive subie par la région positive, qui est plus éloignée. L'attraction subie par l'aiguille métallique de Gilbert (expérience 5) s'interprète de la même manière.

Mais qu'en est-il des brins de paille, petits bouts de tissu ou de papier et autres corps isolants qu'attirait si bien l'ambre frotté ? On constate empiriquement qu'ils subissent le même phénomène de "polarisation" (un côté positif, l'autre négatif), mais il faudra attendre le 20<sup>ème</sup> siècle pour avoir une interprétation microscopique satisfaisante : dans ces matériaux les électrons ne sont pas libres de circuler comme dans



Objet ovoïde et cylindre d'Aepinus. Le cylindre d'Aepinus (1760 env.) permettait de mettre en évidence le phénomène d'influence subi par un conducteur métallique électriquement neutre.

les métaux, mais ce sont les longues molécules constituant les fibres végétales ou les polymères synthétiques qui se polarisent. Les électrons ne quittent pas la molécule mais s'y distribuent de façon légèrement dissymétrique.

Et l'attraction subie par le filet d'eau, lors de l'expérience 4 ?

Chaque molécule d'eau  $H_2O$  [schéma 1, en (1)] équivaut à un dipôle [en (2) : le côté de l'oxygène est négatif, celui des hydrogènes positif]. C'est ce qu'on retrouve sur le schéma 2 : les molécules du filet d'eau sont normalement orientées de façon désordonnée [en (1), sous la "loupe" démesurément grossissante], mais si l'on approche la baguette elles s'orientent sous son influence (2), d'où le résultat à l'échelle macroscopique représenté en (3).

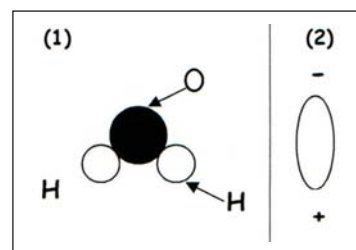


schéma 1

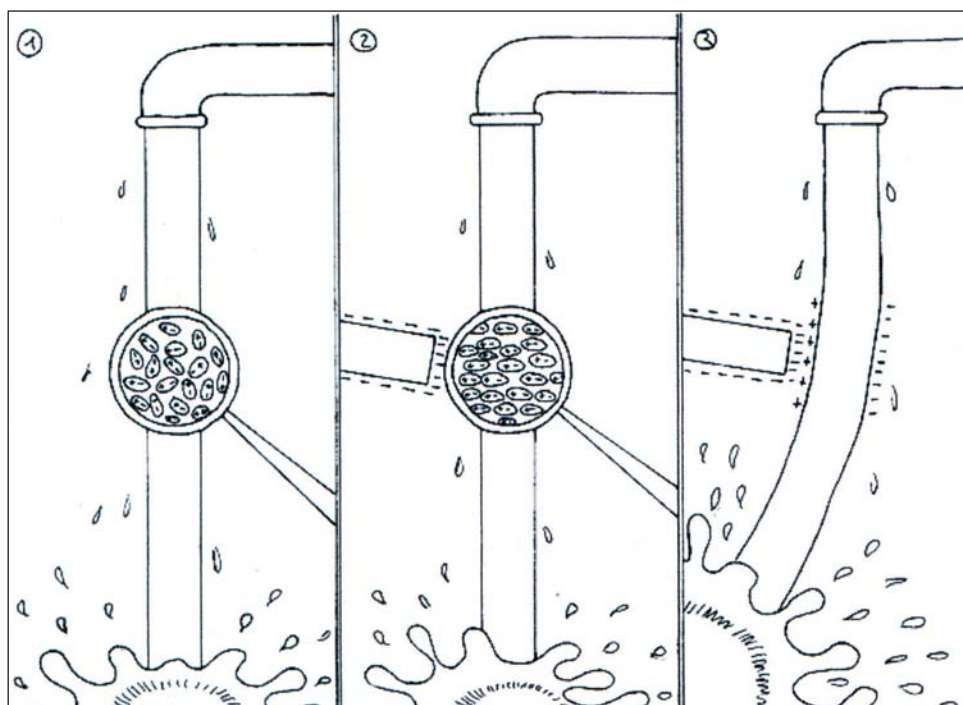


schéma 2. Dessin : Jérôme Colivet, élève de 1ère S en 1997

## Franklin, l'effet des pointes et la nature de la foudre

En 1749, il y a déjà quelques années que l'étincelle électrique provoque des émotions fortes dans les salons, et l'analogie avec la foudre est devenue un lieu commun : Franklin établit une liste de douze similitudes. De plus il sait que les décharges électriques se font beaucoup plus facilement vers les pointes métalliques que vers des conducteurs arrondis, or cela correspond aux observations populaires sur les points d'impact de la foudre ou sur les aigrettes lumineuses apparaissant les jours d'orage sur les mâts des navires. Il suggère alors dans une lettre à la Royal Society de fixer en haut d'un clocher une longue tige métallique isolée reliée à un fil descendant vers le sol et de vérifier qu'au passage d'un nuage d'orage on peut tirer de ce fil, si on en approche un conducteur relié à la terre, une étincelle identique à celle tirée des machines électriques.

L'accueil de la Royal Society est plutôt moqueur<sup>16</sup>. Mais en France **Buffon** s'enthousiasme, d'autant plus qu'en tant que newtonien<sup>17</sup> militant il est "frankliniste", défenseur de l'idée de l'action à distance contre les effluves de l'abbé Nollet. De plus Nollet est le disciple de son ennemi Réaumur. A l'instigation de Buffon, **Dalibard**, un de ses fidèles, traduit en 1751 un ouvrage "électrique" de Franklin, précédé d'un abrégé d'histoire de l'électricité où il ignore délibérément Nollet.

<sup>16</sup> Il est vrai que sa lettre contient aussi des considérations sur les causes de la formation et de l'électrisation des nuages d'orage qui peuvent paraître surprenantes (voir le "Cahier de Science et Vie" cité dans la bibliographie).

<sup>17</sup> Isaac Newton a publié en 1687 la "loi de la gravitation universelle" qui régit l'action attractive exercée à distance par n'importe quelle masse sur une autre, et notamment par le soleil sur les planètes, ou par la Terre sur la lune, etc.

Mais surtout c'est Dalibard qui réalise à Marly en 1752 la fameuse expérience, avec une tige de 13 mètres. La réussite est totale : un jour d'orage on tire de la tige de belles étincelles. Heureusement ce n'est pas la foudre qui est tombée sur la tige (un temps orageux suffit à la charger), sinon la simple approche de l'expérimentateur aurait fait de lui le chemin privilégié de cette foudre vers la terre : en effet contrairement au paratonnerre que Franklin construira quelques années plus tard, l'expérience exigeait que la tige soit isolée du sol. Mais un membre de l'Académie de Saint-Petersbourg qui avait installé la fameuse tige sur le toit de son salon, pour observer plus confortablement les phénomènes

électriques naturels, mourra foudroyé l'année suivante.

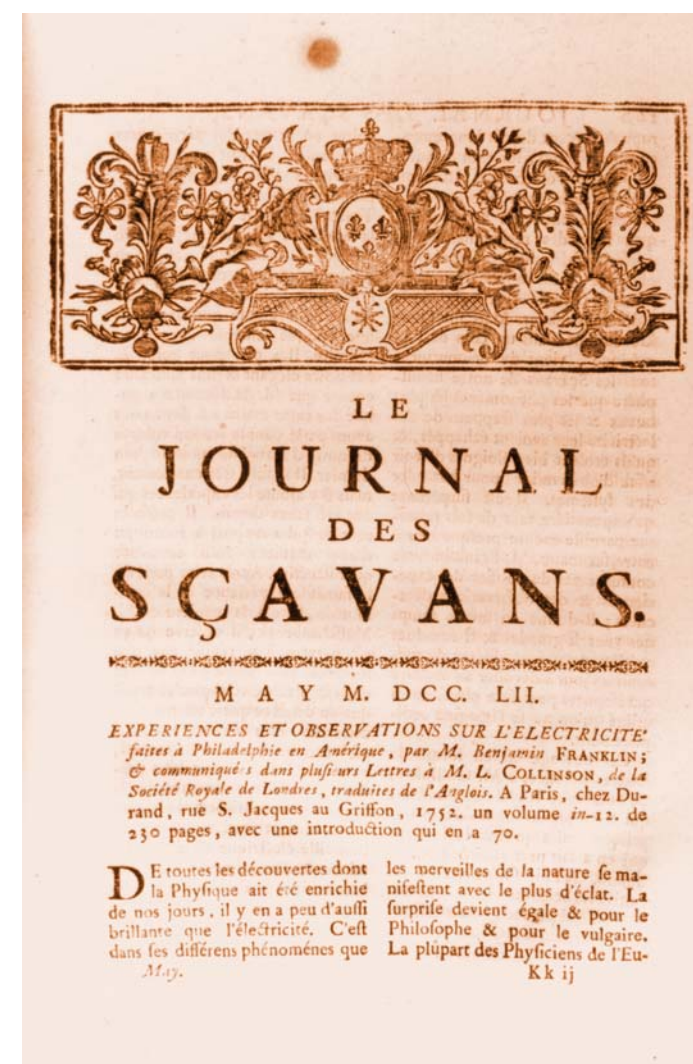
Un peu plus tard la célèbre expérience du cerf-volant envoyé dans les nuages d'orage pour y capter le "feu électrique" sera réalisée non seulement par Franklin, mais aussi en Aquitaine par **Jacques de Romas** : devant 200 personnes il tire entre la corde du cerf-volant et une tige métallique reliée au sol des langues de feu d'une trentaine de centimètres. Ces expériences n'étaient pas sans risque....

### Une réflexion de l'Abbé Nollet :

*"Nous sommes parvenus à toucher le feu du ciel, mais si par ignorance ou par témérité, nos mains profanes en abusent, nous pourrions nous en repentir".*

Malgré ses désaccords théoriques, il fait un éloge sincère de Benjamin Franklin

Les travaux de Franklin sont relatés en mai 1752 dans le journal des savants.



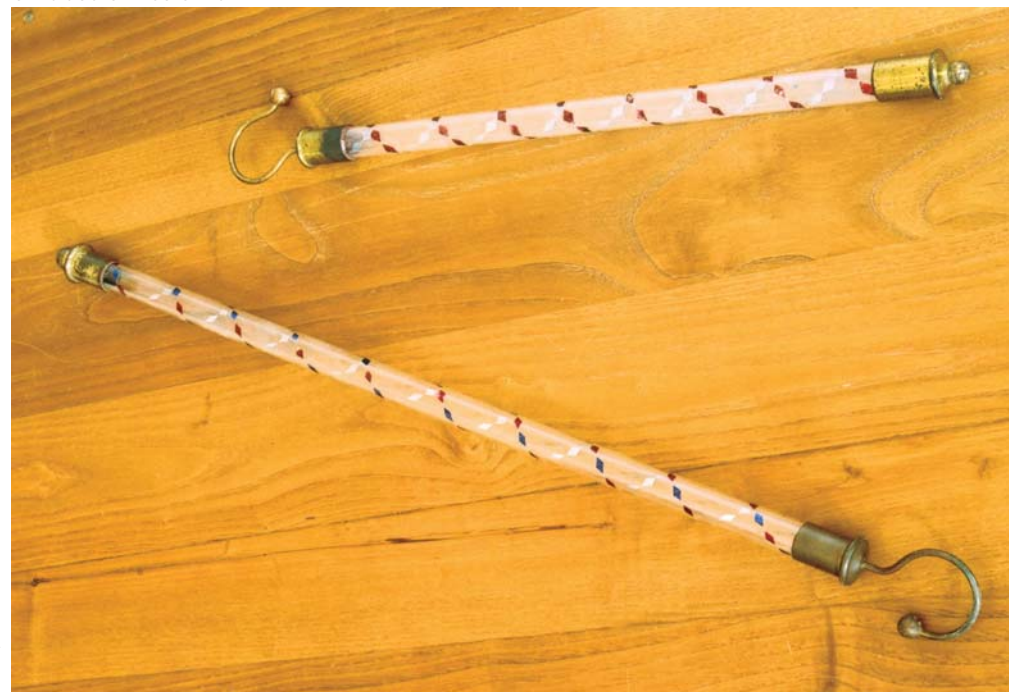
Les rédacteurs du "Journal des sçavans" présentent l'Américain de manière un peu pittoresque : "Mais un Quaker confiné dans un coin de l'Amérique vient de démontrer à tous les savants de notre hémisphère que les phénomènes les plus beaux et les plus frappants de l'électricité leur avaient échappés et qu'ils étaient bien éloignés d'avoir assez d'observation pour hasarder des systèmes... "Il donne" des vues si grandes et si étendues qu'elles nous font espérer de parvenir un jour à dévoiler un mystère qui importe plus à notre utilité que l'on ne se l'imagine actuellement..."

Ne quittons pas Benjamin Franklin sans mentionner ses innombrables contributions à la "science amusante" (il avait même engagé un bateleur qui les présentait à travers l'Amérique). Nous avons déjà rencontré le carillon électrique. Voici d'autres exemples :

**expérience 10** : illustre l'effet des pointes : lorsqu'on relie le tourniquet à l'un des pôles d'une machine électrique, il se met à tourner.  
Interprétation "d'époque" : un excès de "fluide électrique" s'accumule sur les pointes, au point qu'une partie s'en échappe alors, repoussé vivement, ce qui propulse le dispositif par réaction. L'interprétation moderne est un peu plus complexe : la densité de charge étant très élevée sur les pointes, des forces électriques très élevées provoquent l'ionisation des molécules gazeuses voisines. Des particules portant une charge de même signe que la pointe subissent alors une répulsion : un "vent" électrisé fuyant la pointe la propulse par réaction.

**Expérience 11** : Lorsqu'on relie les deux extrémités du tube étincelant aux pôles d'une machine électrique les étincelles jaillissent simultanément dans tous les petits intervalles séparant les petits losanges métalliques qui sont collés sur la face intérieure. Elles dessinent ainsi une hélice lumineuse. Nos carreaux étincelants, sur lesquels divers dessins lumineux sont aussi formés par les étincelles, sont devenus très fragiles. L'expérience a donc été filmée pour éviter d'avoir à la répéter<sup>18</sup>.

Nos collections comportent aussi divers dispositifs à étincelles restés très en vogue dans l'enseignement de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle : perce-carte ou perce-verre, carreaux étincelants et tubes étincelants.



<sup>18</sup> Le film des carreaux étincelants, avec quelques autres films d'expériences sur des instruments anciens, sera disponible sur Cdrom auprès de l'Amélycor.



Le tourniquet électrique

## Les premières lois mathématiques de l'électricité

### Charge et potentiel électrique

Avec Franklin la voie était ouverte pour passer des observations qualitatives au stade quantitatif : attribuer des valeurs aux "quantités d'électricité" portées par les corps, tenter de les déterminer par la mesure. Et les années 1750 voient en effet se multiplier les tentatives pour mesurer les charges électriques. Mais il existe une difficulté : lorsqu'on met en contact deux conducteurs de forme différente on peut constater que la charge électrique se répartit inégalement entre eux. On dira alors qu'ils ont le même "potentiel électrique" mais une "capacité" différente.

Le potentiel mesure en quelque sorte la tendance des charges électriques à fuir leur position du fait de la répulsion des charges voisines. De ce fait tous les points d'un corps conducteur en équilibre électrique sont forcément au même potentiel (souvent appelé à l'époque "degré d'électrification"). C'est alors non pas la différence des quantités de charge électrique portées par deux corps mais bien la "différence de potentiel (ddp)" existant entre ces deux corps qui mesure la tendance du "fluide électrique" à passer de l'un à l'autre : étincelle de la "décharge électrique", ou, lorsqu'on saura après Volta maintenir durablement une différence de potentiel, "courant électrique".

*C'est ce que nous avons déjà affirmé au sujet de l'expérience 7 : il fallait atteindre une ddp suffisante pour que l'étincelle éclate, mais la quantité de charge véhiculée par l'étincelle était beaucoup plus forte lorsque la capacité des deux pôles était fortement augmentée grâce aux bouteilles de Leyde.*

Cette "ddp" est encore appelée tension électrique, nous la mesurons actuellement en volts (c'est le "voltage") et c'est une notion qui fait partie de notre langage familier. La célèbre loi d'Ohm  $U = RI$  traduit la proportionnalité du courant  $I$  dans les conducteurs métalliques à la tension  $U$  qui en est responsable, mais il est remarquable qu'une théorie du potentiel ait pu être développée bien avant la production et l'étude des courants électriques : la loi d'Ohm date de 1827 alors que la notion de potentiel est définie avec précision par **Henry Cavendish** en 1771.

La théorie mathématique du potentiel électrique sera encore développée par **Lagrange**, **Laplace** et achevée en 1813 par **Poisson** (donc après la naissance de la pile

mais sans que le nouveau domaine de l'électricité ouvert par la découverte de Volta ait joué un rôle<sup>19</sup>).

### La force électrique est-elle "newtonienne" ?

On a vu que l'idée d'une analogie entre gravitation et électricité existait déjà chez Otto Von Guericke. Cent ans plus tard, la tentation est beaucoup plus forte.

D'abord parce qu'entre temps **Newton** a énoncé ses trois lois de la mécanique<sup>20</sup> et sa fameuse loi de la gravitation : la force attractive qui s'exerce entre deux corps est proportionnelle à leurs masses  $m$  et  $m'$  et inversement proportionnelle au carré de leur distance  $d$  (si  $d$  double la force est divisée par quatre, etc.)<sup>21</sup>. Le fait que les lois de Newton rendent compte remarquablement des mouvements célestes aussi bien que du mouvement des projectiles terrestres explique l'extraordinaire succès de sa théorie, malgré les combats d'arrière garde des partisans de la physique qualitative de Descartes. Vers 1750 l'idée que les attractions et répulsions magnétiques et électriques sont aussi "en  $1/d^2$ " (inversement proportionnelles au carré de la distance) est "dans l'air".

D'autre part les expériences de Franklin apportent des arguments en faveur du modèle "newtonien". Par exemple la constatation, en 1755, que si l'on introduit une charge à l'intérieur d'un conducteur creux chargé (une boîte métallique par exemple), elle ne subit aucune force (c'est une des propriétés de ce qu'on appelle maintenant une "cage de Faraday"). Or **Joseph Priestley**<sup>22</sup> est un admirateur de Franklin en même temps qu'un excellent connaisseur de la physique de Newton. Il sait par exemple qu'une conséquence de la loi de Newton en  $1/d^2$  est que "si la Terre avait la forme d'une coquille, un corps placé à l'intérieur de celle-ci ne serait attiré ni d'un côté, ni de l'autre", "ne pouvons-nous pas déduire de ceci [l'expérience de Franklin] que

<sup>19</sup> Il s'agit bien plus de la transposition à l'électrostatique des notions développées par ces mêmes savants dans le cadre de la théorie newtonienne de la gravitation.

<sup>20</sup> 1. Principe de l'inertie : un corps qui n'est soumis à aucune force persévère dans un mouvement rectiligne uniforme.

2. Proportionnalité de l'accélération  $a$  subie par un corps de masse  $m$  à la force  $F$  qui cause l'accélération :  $F = m \cdot a$

3. Egalité de l'action et de la réaction (ou "principe des actions réciproques")

<sup>21</sup> Une formule !  $F = G \cdot m \cdot m' / d^2$

<sup>22</sup> Savant anglais de culture encyclopédique, surtout connu pour sa découverte de l'oxygène, cet ecclésiastique acquis aux idées de la Révolution française émigra en 1794 en Amérique, à Philadelphie.

L'attraction électrique est soumise aux mêmes lois que la gravitation et est par conséquent proportionnelle à l'inverse du carré des distances ?" écrit-il en 1767. Mais il faudra le génie de **Cavendish** pour poursuivre la démonstration : il montre dans son unique mémoire de 1771 non seulement qu'une loi en  $1/d^2$  conduit bien à une action nulle à l'intérieur d'une sphère creuse, mais permet de plus de prévoir comment l'électricité se distribue sur la surface de conducteurs de formes diverses. Surtout il a été beaucoup plus loin, dans des travaux jamais publiés<sup>23</sup> retrouvés cent ans plus tard par **Maxwell** ! En effet il a constaté expérimentalement avec une précision extrême l'absence d'action à l'intérieur d'une sphère creuse et montré mathématiquement que seule une loi en  $1/d^2$  pouvait produire cet effet (1772-73). Puis il a démontré que cette loi en  $1/d^2$  avait pour autre conséquence que la charge de tout corps *conducteur* devait être obligatoirement distribuée sur sa surface externe, en accord avec l'expérience.

**Expérience 12** : Notre *cage de Faraday* artisanale est formée d'un grillage métallique. Lorsqu'on la charge par contact avec un des pôles de la machine de Wimshurst, les boules des pendules accrochés du côté extérieur se chargent et sont repoussées, tandis que celles des pendules accrochés à l'intérieur restent en contact avec le grillage, faute de charge électrique sur la face interne de la grille. Plus spectaculaire : Faraday, en 1835, s'installe lui-même dans une cage portée à un potentiel très élevé. Un assistant tire donc à l'extérieur d'impressionnantes étincelles, tandis que Faraday vérifie tranquillement à l'intérieur l'absence de charges. Vous pouvez vous proposer comme cobaye pour une réalisation encore plus spectaculaire au Palais de la Découverte...

**Expérience 13** : les "*hémisphères de Cavendish*". Une sphère de laiton montée sur un support isolant, a été électrisée, comme on le vérifie à l'aide d'un électroscope. Deux coquilles hémisphériques de laiton, tenues par des manches isolants, peuvent envelopper exactement la sphère. Après contact l'électroscope montre que la sphère n'est plus chargée, et que la charge initiale est maintenant portée par les deux hémisphères : elle a donc bien "fui" vers la surface la plus externe..

Ces travaux de Cavendish restant pour longtemps ignorés du public, c'est Coulomb qui sera considéré comme "l'inventeur" de la loi qui porte désormais son nom. C'est lui en tous cas qui en fera le premier la vérification expérimentale directe.



hémisphères de Cavendish

## La mesure de la force électrique : la "loi de Coulomb"

**Charles-Augustin Coulomb** est ingénieur militaire<sup>24</sup>. D'une compétence remarquable, mais pas toujours enthousiaste : comme il l'exprime sans ambages, à ses yeux la pratique de la science est un puissant dérivatif à l'ennui<sup>25</sup>. Correspondant de l'Académie des Sciences en 1774, il en deviendra membre en 1781. En 1802, il fait partie, avec le naturaliste Cuvier et l'astronome Delambre des inspecteurs généraux désignés pour superviser la construction des futurs établissements scolaires<sup>26</sup>.

<sup>24</sup> A ce titre il a dirigé dans des conditions très dures le très gros chantier de l'édification du Fort Bourbon à la Martinique.

<sup>25</sup> Pussions nous en convaincre nos lycéens !

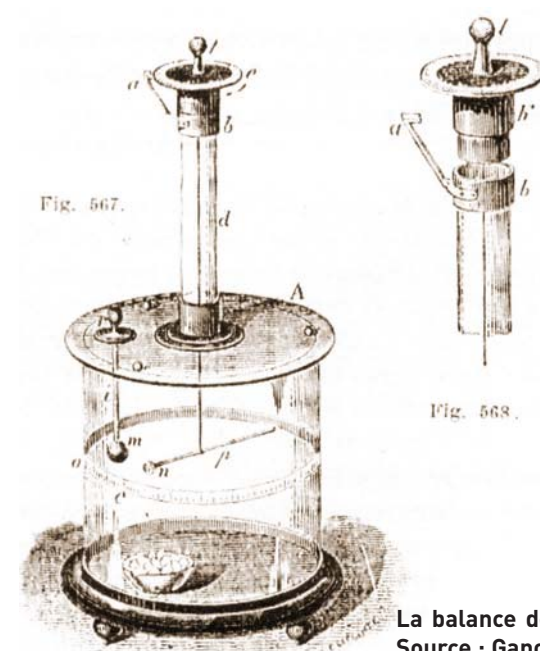
<sup>26</sup> Dans le cadre du plan de réorganisation du système éducatif français établi par le chimiste **Fourcroy**. En ces temps de bicentenaire de notre Lycée, il peut être intéressant de se demander dans quelle mesure il est un "Lycée Coulomb" !

Il semble qu'il ait laissé bien peu de place à l'ennui dans sa vie, si l'on en juge par la diversité et la profondeur de ses travaux théoriques et expérimentaux : magnétisme, résistance des matériaux, lois des machines simples, frottement - avec une étude à grande échelle sur le lancement des navires -, aérostatique, utilisation de l'énergie thermique ("machines à feu") ...

Pour le sujet qui nous intéresse tout commence par un détour par le magnétisme : l'Académie ouvre en 1775 un concours sur la construction de boussoles de précision, capables notamment de mesurer les très faibles variations diurnes du champ magnétique terrestre. Avec les boussoles posées sur un pivot, impossible de supprimer totalement les frottements. Aussi Coulomb a-t-il l'idée des suspendre l'aiguille aimantée à un fil très fin de soie naturelle. Mais la torsion du fil de soie, si faible soit-elle, lorsque l'aiguille dévie un peu de sa position moyenne, ne fausse-t-elle pas la direction, en opposant une résistance à cette déviation ?

Coulomb se lance donc dans une minutieuse étude expérimentale de la torsion de fils de matériaux divers (cheveu, soie, métal...). Parmi les lois qu'il établit nous en retiendrons une : "les forces qui ramènent un corps à sa situation naturelle sont proportionnelles à l'angle de torsion".

La torsion d'un fil, d'abord perçue comme un inconvénient, va devenir une ressource : avec un long fil très fin d'un matériau bien choisi, on pourra comparer entre elles des forces extrêmement faibles, ce qui est le cas des forces entre objets électrisés, en comparant les angles de torsion qu'elles provoquent. C'est le principe de la balance de torsion (1784) sensible, nous dit Coulomb, à des forces infimes, de l'ordre du poids d'un objet d'un milliardième de gramme ! C'est avec une telle balance qu'il va en 1785 mesurer la force électrique, puis poursuivre ses expériences jusqu'en 1788.



La balance de Coulomb. Source : Ganot 1880 env.

Coulomb annonce dès 1785 les résultats suivants : pour diviser par deux la distance, il faut quadrupler l'angle de torsion. La force de répulsion, qui lui est proportionnelle, est donc quadruple. Pour diviser

**La balance de Coulomb** : Coulomb suspend à un très fin fil d'argent la tige isolante horizontale *np* portant la petite boule *n*. La partie supérieure du fil est pincée dans un micromètre permettant de contrôler avec précision la torsion du fil. Une autre tige isolante verticale porte la boule *m*. La cage de verre abrite des courants d'air et porte en *c* un cercle gradué de 0 à 360°. Initialement *m* et *n* sont en contact et l'on s'assure que la torsion du fil est nulle.

**Expérience 14** : on retire la tige *i* pour charger *m*, à l'aide par exemple d'une machine électrostatique. On réintroduit la tige, *n* s'électrise alors par contact avec *m* et les deux boules chargées se repoussent : la tige *np* tourne d'un angle qu'indique le cercle gradué, "angle de torsion" du fil. Cherchons maintenant à réduire la distance entre *m* et *n* : il faut pour cela tourner dans le sens contraire la partie supérieure, d'un angle indiqué par la graduation du micromètre, et l'on peut connaître ainsi la nouvelle valeur de l'angle de torsion.



encore la distance par deux, il faut quadrupler l'angle à nouveau. Coulomb peut affirmer alors avoir fondé par l'expérience sa loi fondamentale de l'électricité : la force de répulsion varie comme l'inverse du carré des distances. Il étend peu après ce résultat à la force attractive entre charges de signes contraires. C'est la "loi de Coulomb" qu'apprennent les lycéens scientifiques :  $F = k \frac{Q \cdot Q'}{d^2}$ <sup>27</sup> où  $Q$  et  $Q'$  sont les valeurs des charges électriques. Ces dernières se trouvent du coup rigoureusement définies et mesurables : on peut comparer des charges par la comparaison des forces qu'elles suscitent à distance  $d$  donnée<sup>28</sup>.

Mais l'expérience est incroyablement délicate<sup>29</sup> : les fils très fins cassent, la balance est sensible aux moindres vibrations et aussi aux influences électriques de l'environnement (y compris la faible électrisation éventuelle de l'expérimentateur) ; de plus le bras horizontal oscille longtemps avant de trouver ses positions d'équilibre successives, or si l'expérience dure plusieurs minutes il y a déperdition de charge dans l'air (qu'on essaye de minimiser en desséchant l'air, d'où la capsule de chaux vive dans l'illustration tirée du Ganot ...). Coulomb, dans son mémoire de 1785, ne dit mot des trésors d'astuce expérimentale et des précautions nécessaires, et pourtant il est peu vraisemblable qu'il soit tombé "du premier coup" sur les "bons résultats" annoncés. N'oublions pas qu'il savait ce qu'il souhaitait "trouver par l'expérience" ! On comprendra en tous cas que nous nous soyons contentés lors de l'expérience ci-dessus d'en montrer le principe tout en nous gardant de relever des valeurs numériques....

### Les triomphes de l'électrostatique quantitative :

Toutes les bases sont posées, en cette fin du 18ème siècle, pour une étude quantitative, aussi bien théorique qu'expérimentale, des phénomènes électrostatiques. Par exemple, l'étude de la répartition des charges électriques à la surface des conducteurs : la loi en  $1/d^2$  permet à Coulomb de prévoir comment elle dépend de la forme de ces derniers, et en particulier de justifier l'existence d'une densité de charge plus forte sur les parties pointues que sur celles de faible courbure. "L'effet des pointes" trouve ainsi sa justification.

**L'objet ovoïde** (photographié page 22 avec le cylindre d'Aepinus) permet d'en faire la vérification quantitative. On l'électrise, puis un "plan d'épreuve" - petite surface métallique plane tenue par un manche isolant - est appliqué en un point de sa surface. La charge qui existait en ce point se trouve alors transférée sur la surface externe du plan d'épreuve, comme l'avait montré

<sup>27</sup> La similitude avec la loi de Newton de la gravitation est évidente (voir note 21)

<sup>28</sup> Et il était dès lors légitime de donner le nom de "coulomb" à l'unité de charge électrique !

### Petite parenthèse pédagogique (et facultative !) :

Assez vite au 19ème siècle la "balance de Coulomb" figure dans les manuels de cours puis dans l'équipement des Lycées. Et jusqu'à la fin du 19ème siècle sa description minutieuse et l'énoncé des valeurs du mémoire de 1785 tiennent lieu de démonstration expérimentale, le professeur montrant respectueusement la balance et se gardant de l'utiliser pour réaliser des mesures (la référence déjà citée<sup>29</sup> analyse l'utilisation de cette "balance fétiche" dans l'enseignement). On peut railler à juste titre cette caricature d'enseignement "expérimental". Mais on pourrait aussi en profiter pour noter que les instruments des découvertes sont souvent très éloignés de ceux utilisés pour une prétendue "redécouverte" dans nos TP de lycée, qui mentent donc eux aussi, à leur manière, sur la démarche expérimentale réelle de la physique.

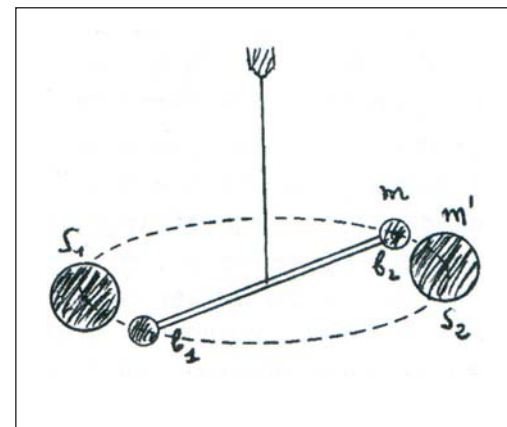
Avec Coulomb l'expérience de physique prend en effet un tournant intéressant : jusque là l'expérience est la plupart du temps un spectacle (voir l'abbé Nollet) partagé par de nombreux spectateurs, ce qui en valide aux yeux de tous les résultats. Au contraire avec Coulomb et sa balance de torsion, et déjà avec ses boussoles suspendues qu'il fallait abriter de toute influence parasite et du moindre souffle d'air dans les caves profondes de l'observatoire de l'astronome Cassini, on entre dans l'ère moderne du laboratoire où des instruments de mesure précis doivent être protégés du public et de l'expérimentateur lui-même ! La validation, par la reproduction dans d'autres laboratoires également spécialisés, avec d'autres appareils, prend une forme nouvelle.

Montrer un appareil, en expliquer le principe, dire sa place dans l'histoire de nos connaissances, dire aussi ce que sont les difficultés d'une expérience de laboratoire et pourquoi nous ne la reproduisons pas au lycée, serait-ce si contraire à la formation de l'esprit scientifique ? On aura compris que j'éprouve pour la balance de Coulomb une certaine nostalgie...

l'expérience 13. Il suffit (!!)<sup>30</sup> de porter ce dernier dans la balance de Coulomb pour voir que cette charge est minimale dans la région de moindre courbure, et maximale à la pointe.

<sup>29</sup> Voir dans le "Cahier de Science et Vie" sur la "force électrique" (cité en bibliographie) une discussion détaillée, et notamment une tentative récente de "réplication de l'expérience".

<sup>30</sup> Nous dit le Ganot ! Mais le professeur ne se risquait sans doute pas à réaliser l'expérience en classe, à moins d'avoir les qualités d'expérimentateur de Coulomb. Une comparaison grossière à l'aide d'un électroscope est moins délicate.



### De la balance de Coulomb à la "pesée de la Terre" par Cavendish

Les applications de la balance de torsion inventée par Coulomb vont se multiplier tout au long du 19ème siècle (donc hors du cadre de ce récit) : galvanomètres (mesure des très faibles courants), boussoles et électromètres .... Mais sortons un moment du domaine de l'électricité pour citer un résultat magnifique : avec **Cavendish** - encore lui ! - la balance électrique devient balance gravitationnelle.

Les forces attractives sont celles entre les petites boules  $b_1$  et  $b_2$  (fixées aux extrémités du bras horizontal de la balance) et deux lourdes sphères de plomb fixes  $S_1$  et  $S_2$ . La balance est si sensible qu'elle peut déceler des forces gravitationnelles exercées par les sphères (S) sur les boules (b) 500 millions de fois plus faibles que le poids de ces boules ! Et c'est précisément en comparant la force exercée sur la masse  $m$  par (S), dont la masse  $m'$  est connue, au poids de (b) - qui est la force exercée sur  $m$  par la Terre de masse  $M'$  - que Cavendish trouve en 1798 le rapport  $M'/m'$  et donc la masse de la terre !<sup>31</sup>

<sup>31</sup> En utilisant bien sûr la loi de Newton - voir note 21 .

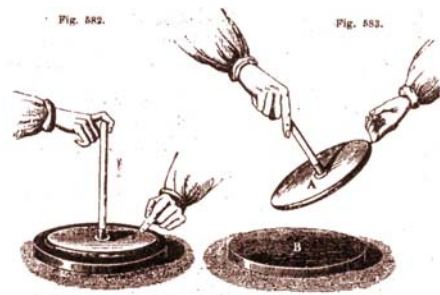
## Alessandro Volta entre en scène

**Alessandro Volta**, professeur de physique à Côme, puis à Pavie, est un électricien réputé dans toute l'Europe avant même la polémique avec Galvani qui le mènera de 1792 à 1800 à la découverte de la "pile" et de l'électricité dynamique. Très intéressé par les travaux de Franklin, il a mis au point un électromètre très sensible pour détecter l'électricité atmosphérique. Le "pistolet de Volta" (voir p.7), où une étincelle électrique peut déclencher une combustion explosive, peut donner lieu à d'amusantes expériences de salon, surtout si le pistolet a été placé dans la poche d'un spectateur... mais sous forme plus sérieuse c'est l'eudiomètre, où l'étincelle déclenche la combustion explosive d'un mélange gazeux. C'est alors un nouvel instrument d'étude précieux pour la chimie quantitative naissante : ainsi peut-on mettre en évidence les rapports entre les volumes gazeux consommés par une réaction chimique (il faut par exemple deux volumes d'hydrogène pour réagir avec un volume d'oxygène...).

### De l'électrophore de Volta aux machines électriques à influence

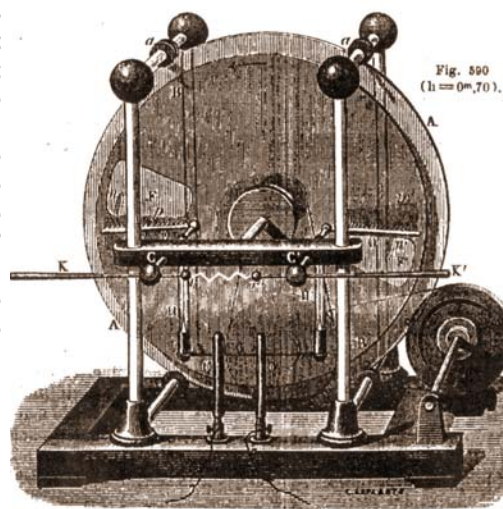
Volta est aussi l'inventeur (en 1775) de l'"électrophore". A première vue rien d'extraordinaire : un simple disque de laiton (ou de bois recouvert d'une mince feuille d'étain) tenu par un manche isolant, et une galette de résine. Mais l'idée est ingénieuse...

**Expérience 15** : on frotte la résine avec une fourrure. Elle se trouve alors électrisée négativement. On pose alors l'électrophore sur la galette tout en touchant le disque pour le mettre "à la terre" (fig. de gauche). L'influence de la galette fait donc fuir vers la terre les charges négatives du disque. Il suffit alors, après avoir rompu la mise à la terre, de retirer l'électrophore tenu par son manche isolant pour disposer d'un disque chargé positivement, ce qu'on peut mettre en évidence en tirant une petite étincelle (fig. de droite). Mais surtout on peut "déposer" cette charge sur une des armatures d'une bouteille de Leyde. Comme la galette est restée chargée, on peut recommencer en principe autant de fois qu'on veut et accumuler ainsi une charge importante dans la bouteille.



Cet électrophore est le précurseur des machines qui, à partir d'une électrisation initiale très minime, utilisent le phénomène d'électrisation par influence pour accumuler de l'électricité. Au lieu du va-et-vient fastidieux entre la galette responsable de l'influence et la bouteille de Leyde, des dispositifs ingénieux (l'explication détaillée en serait longue et complexe!) permettent d'arriver plus simplement aux mêmes résultats. Sur des disques de verre mis en rotation par une manivelle sont collées des languettes qui jouent le même rôle que le métal de l'électrophore : électrisées par influence, déchargées vers bouteille de Leyde ou condensateur, électrisées à nouveau lors du tour ou demi-tour suivant, etc.... Ces machines sont à puissance égale considérablement moins encombrantes que les machines à frottement en vogue du temps de Nollet<sup>32</sup>, mais leur apparition est tardive, même si leur principe ne fait que prolonger le procédé de Volta. Ce sont en général des machines de la 2<sup>ème</sup> moitié du 19<sup>ème</sup> siècle, et si elles figurent malgré tout dans cet exposé, c'est que nous avons dû les utiliser dans nos expériences, faute de disposer d'une antique machine à frottement en état de marche...

On peut citer les machines de Holtz (vers 1865), de Carré et surtout celle de Wimshurst (vers 1882) qui est toujours utilisée dans les lycées et que nous avons utilisée lors des expériences 7 et 9 notamment. La gravure ci-contre représente la machine de Holtz (Ganot, éd. vers 1880).



<sup>32</sup> Le lecteur pointilleux pourrait faire remarquer que la machine de Ramsden (page 19) utilisait déjà le phénomène d'influence : c'est grâce à lui (et à l'effet des pointes) que l'électricité du disque de verre pouvait être captée par les pointes des peignes métalliques et accumulée sur les gros cylindres métalliques. Mais la production de l'électricité y était entièrement due au frottement, et c'est le travail mécanique de l'opérateur contre le frottement qui était à l'origine de l'énergie électrique. Au contraire, avec l'électrophore et les machines à influence, l'électrisation initiale une fois obtenue, c'est l'influence qui explique entièrement la production ultérieure d'électricité, et c'est le travail mécanique de l'opérateur (contre les forces qui tendent à rapprocher les charges qui s'influencent mutuellement) qui est à l'origine de l'énergie électrique emmagasinée.

## "Des grenouilles de Galvani à la pile de Volta..." <sup>33</sup>

### Le contexte : chimie, électricité et sciences naturelles

A la fin du 18<sup>ème</sup> siècle les théories mécanistes du "fonctionnement" animal héritées de Descartes, voire même de Galien (2<sup>ème</sup> siècle), sont plus que contestées. Ces thèses attribuaient la contraction musculaire à l'action exercée par un fluide que véhiculeraient les nerfs...

**Lavoisier**, entre 1780 et 1785, attribue la production de la "chaleur animale" à une "combustion lente" des composés carbonés et hydrogénés : consommation d'oxygène, production de gaz carbonique<sup>34</sup> et de vapeur d'eau. Les poumons seraient pour lui le siège de cette combustion. Mais **Spallanzani** montre que tous les organes absorbent de l'oxygène et rejettent du gaz carbonique. Puis Lavoisier montre en 1789 le lien entre travail musculaire et consommation d'oxygène. La voie est ainsi ouverte à l'interprétation de la contraction musculaire en termes de réactions chimiques.

D'autre part de nombreuses observations sur la contraction musculaire d'animaux décapités montrent que "l'irritabilité" spécifique des tissus musculaires ne doit rien aux fluides cartésiens. Si les rôles respectifs du nerf et du muscle sont loin d'être élucidés, c'est bien maintenant du côté de la chimie et de l'électricité et non plus de la mécanique que l'on cherche des réponses.

L'électricité ? Dès les années 1750, alors que la "secousse électrique" amusait la cour et les salons, les naturalistes se penchaient sur ses effets physiologiques : effets de la décharge électrique sur cœur ou muscles animaux, effets thérapeutiques ... Puisque les décharges de la bouteille de Leyde provoquent de fortes contractions et même parfois des paralysies temporaires, pourquoi l'inverse ne serait-il pas possible : les "électriciens guérisseurs" se proposent, entre autres, de guérir les paralytiques. L'idée est ancienne : les romains utilisaient les décharges de la torpille pour soigner certaines maladies. (Ils en ignoraient bien sûr la nature électrique : c'est Walsh qui l'établit en 1777 en tirant de ce poisson une étincelle). Les machines électriques se multiplient dans les hôpitaux, et l'on polémique sur la réalité des "guérisons" observées...

<sup>33</sup> Sous-titre emprunté à Jean-Pierre Maury (ouvrage cité en bibliographie)

<sup>34</sup> Nous avons transposé en langage moderne : le gaz carbonique (dioxyde de carbone) était pour Lavoisier "l'acide crayeux aériforme".

### LE "FLUIDE ELECTRIQUE" ET LA MEDECINE

(Texte et recherches bibliographiques : Jean-Noël Cloarec)

L'abbé Nollet a - bien entendu ! - "électrisé" des êtres vivants : des végétaux, des animaux (pigeons, pinsons, chats...). Il ne fut jamais vraiment persuadé des vertus thérapeutiques de l'électricité. Lors d'un voyage en Italie il rencontra un certain Pivati devenu célèbre après avoir "guéri" l'évêque de Sebenico handicapé, du fait de la goutte, par des doigts déformés et crochus. L'abbé Nollet écrivit à un correspondant que "Pivati m'avoua en présence de la compagnie que l'évêque était dans le même état qu'il avait été avant l'électrisation. Il n'y a aucun fond à faire sur ce qu'a débité monsieur Pivati..."

Mais si l'abbé Nollet fait preuve d'une saine réserve... beaucoup succombent à l'enthousiasme et "voient" les effets qu'ils espéraient. C'est le cas du chanoine Sans qui pense à la "guérison de la paralysie par l'électricité" (*Journal des Sçavans*, oct. 1772 p. 684), et de l'abbé Bertholon de Béziers qui sous forme d'une "lettre à Messieurs les Auteurs du Journal des Sçavans sur l'électricité appliquée au mal de dents" propose "un nouveau remède où la théorie et la réflexion m'ont conduit et dont j'ai reconnu l'efficacité par des expériences, c'est dans l'électricité qu'on trouve ce nouveau secours..."

En février 1769, le Journal des Sçavans rend compte des travaux de J. Gardanne de la Faculté de Médecine de Paris (*"Conjecture sur l'électricité médicale"*). Cela semble plus sérieux :

"Ce médecin a guéri un plombier qui à la suite de la colique des plombiers avait les bras et les mains pendants dans l'état de relâchement le plus complet..." "Le septième jour, Monier soutint une barre de fer de un pouce et demi d'épaisseur sur un pied de long et après électrification il vint à bout à soulever de la main un fauteuil de 15 à 18 livres".

Peu à peu l'enthousiasme retombe et la "thérapie électrique" finit par être oubliée.

Toujours est-il que dès les années 1770 s'imposait l'idée d'une analogie entre "influx nerveux" et "fluide électrique" : même invisibilité, même extraordinaire rapidité de transmission. Et dans les années 90 trois quarts des articles scientifiques traitant de l'électricité portent sur son action sur l'homme ou l'animal.

## Les grenouilles de Galvani

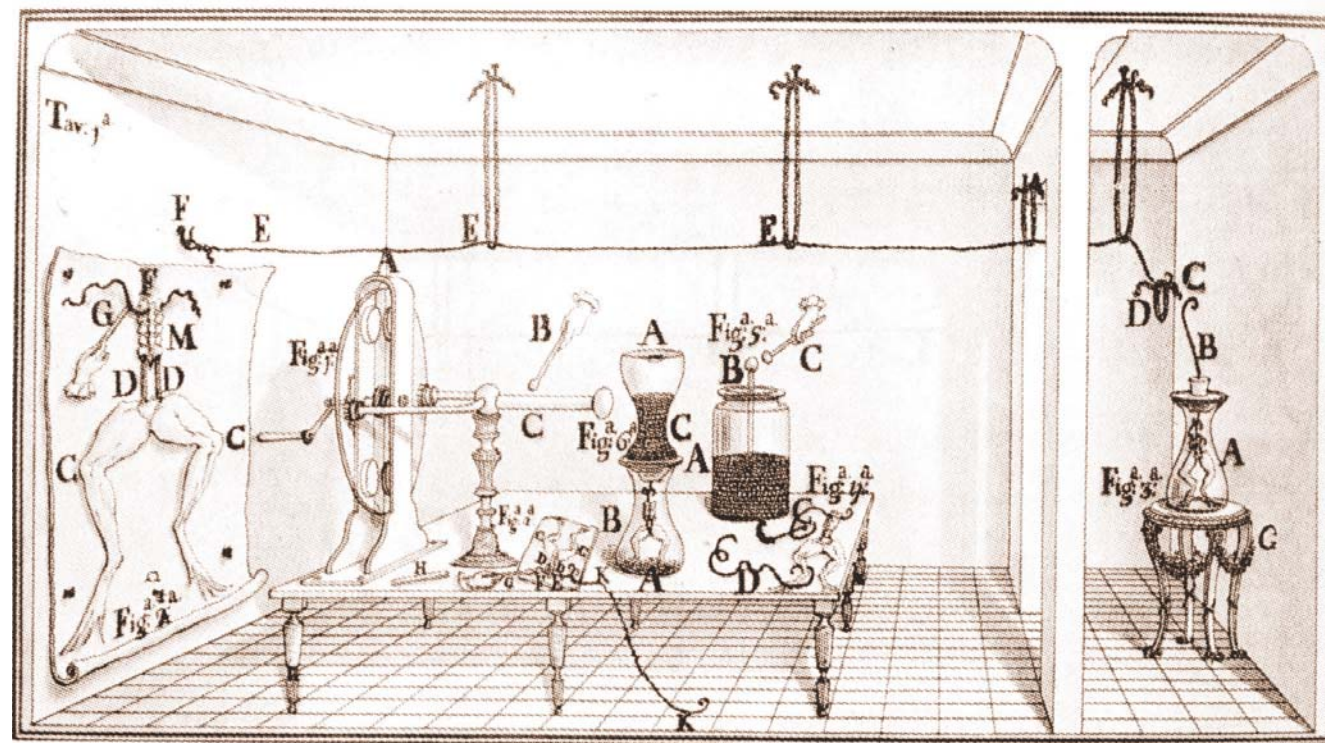
En 1780, **Luigi Galvani**, nouveau professeur d'anatomie à Bologne, s'intéresse à son tour à l'influence de l'électricité, et reproduit notamment des expériences antérieures<sup>35</sup> sur l'application directe de l'électricité au nerf crural de la grenouille, commandant une violente contraction de la cuisse. Dans son laboratoire, rien d'étonnant donc à ce qu'on trouve machine électrique, bouteilles de Leyde, et grenouilles décapitées.

Il fait alors une observation étonnante, qu'il publiera seulement en 1791 : alors qu'il vient de disséquer une grenouille, le hasard veut que son assistant touche le nerf avec un scalpel au moment où une étincelle jaillit de la machine située, écrit-il, "à quelque distance". La cuisse se contracte ! Comme si l'ensemble formé par scalpel, nerf et muscle détectait à distance la décharge. Galvani, avec l'aide de sa femme, cherche à reproduire l'expérience en variant les conditions : pourquoi ne pas remplacer la décharge de la machine par des éclairs orageux ? Le scalpel est remplacé par un fil et un crochet de cuivre, et l'on suspend ainsi les cuisses de grenouille sur la terrasse: elles se contractent à chaque éclair !

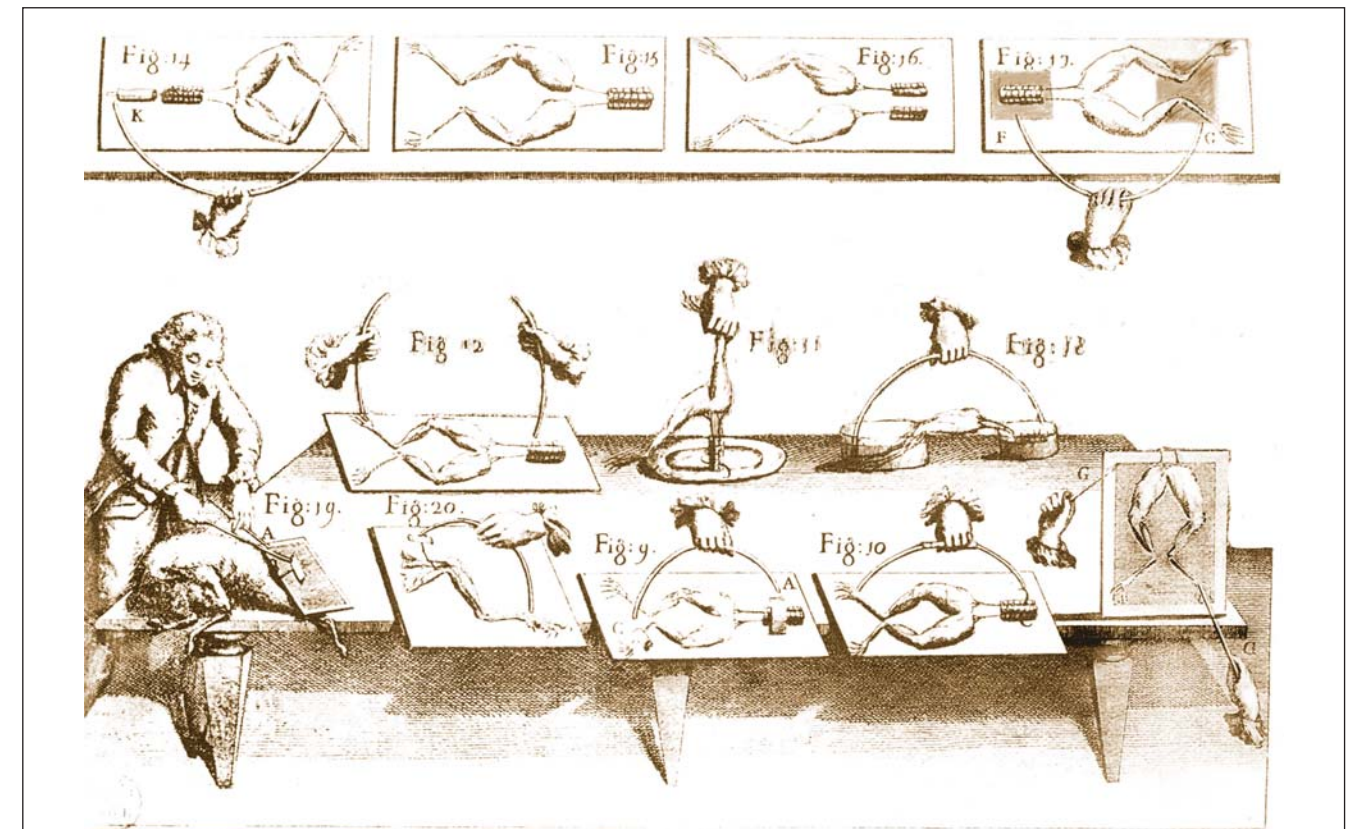
*L'explication viendra un siècle plus tard : l'étincelle ou l'éclair engendrent un bref rayonnement électromagnétique auquel scalpel ou fil "font antenne", d'où l'excitation électrique à distance du nerf.*

Si un jour de l'année 1786, des cuisses de grenouille sont suspendues au grillage d'un balcon par un crochet de cuivre, ce n'est donc pas pur hasard, comme on le lit parfois. Mais alors par temps calme, rien ne devrait se passer ! C'est là que le hasard intervient : l'extrémité inférieure du membre vient de temps à autre toucher le fer du balcon, et cela déclenche à chaque fois une forte contraction. Ne serait-ce pas tout de même encore un effet de l'état électrique de l'atmosphère ? Pour s'en assurer Galvani réalise l'expérience dans une chambre protégée des influences électriques, et le résultat est le même : des contractions spasmodiques se produisent lorsqu'un "arc métallique" fer-cuivre relie le nerf et le muscle. C'est un fait radicalement nouveau ! Les causes d'excitation par une source électrique externe semblent totalement éliminées. Dès lors Galvani multiplie les essais : en modifiant les métaux l'effet est plus ou moins violent, avec des non-conducteurs il ne se passe rien...

Et il conclut : "*ceci [...] me conduisit à soupçonner que l'électricité était inhérente à l'animal lui-même*". Il existerait donc en permanence dans l'ensemble nerf - muscle (qu'il compare aux armatures d'une bouteille de Leyde) une "*électricité animale*" qui se déchargerait lorsque nerf et muscle sont reliés par l'arc métallique. La publication de ses travaux en 1791 vient au terme de onze années de longues et minutieuses recherches.



Le laboratoire de Galvani d'après un dessin utilisé pour illustrer la publication de ses travaux



Sur cette illustration, divers essais sur la grenouille et sur un mouton. En haut à droite (fig.17), une plaque d'argent sous les vertèbres de la grenouille, et une plaque de cuivre sous ses pattes.

## Electricité animale ou "électricité métallique" ? la controverse Galvani - Volta

Dès 1792 Volta répète les expériences de Galvani. Il constate qu'il suffit de mettre "l'arc métallique" en contact avec deux points différents du nerf pour provoquer la contraction : le muscle n'est donc pour rien dans la production de l'électricité.

Puis en 1793 il constate qu'en plaçant les deux métaux de part et d'autre de sa langue, il ressent des picotements<sup>36</sup>, analogues à ceux que produit le contact de la langue avec un conducteur relié à un des pôles d'une machine électrique. Il constate aussi que cet effet disparaît lorsque les deux métaux sont identiques. Or il en était de même dans l'expérience de Galvani : la contraction musculaire n'a pas lieu si "l'arc" est formé d'un seul métal parfaitement homogène.

Volta rejette alors l'interprétation de Galvani. Pour lui l'organisme ne fait que réagir à l'action électrique (en termes modernes c'est le récepteur) tandis que le couple des deux métaux est la source de cette action (le générateur)<sup>37</sup>.

<sup>36</sup> Il est facile d'en faire soi-même la constatation, en pinçant sa langue entre lame de cuivre d'une part et lame de fer (mieux : zinc ou aluminium) d'autre part.

<sup>37</sup> Dans une lettre de 1796, il insistera sur le rôle indispensable de "l'humeur" (solution aqueuse) interposée entre les deux métaux. Pourtant en 1800 il fera l'erreur de voir dans le seul contact de ces métaux la source de la tension électrique.

*Coup d'œil rétrospectif : dans les conditions des expériences de Galvani et Volta décrites jusqu'ici, le générateur est le sandwich 1<sup>er</sup> métal/ solution aqueuse/ 2<sup>ème</sup> métal tandis que l'organisme est "récepteur". C'est Volta qui a raison!*

Electricité métallique contre électricité animale : c'est le début d'une véritable guerre scientifique entre "galvanistes" et "voltaïstes". Et les partisans de Galvani ont dès 1794 de sérieux arguments : la contraction musculaire peut être provoquée à l'aide d'un seul métal, et même sans métal : il suffit que le nerf soit mis en contact avec un point de la surface externe du muscle. Et où sont les métaux dans l'organe électrique du poisson torpille ?

*Nouveau coup d'œil rétrospectif : dans ces deux cas, Galvani et ses partisans ont raison ! Il existe bien des différences de potentiel électrique d'origine organique, mais beaucoup plus faibles que celles produites par la "pile élémentaire" métal 1 - solution - métal 2: on en mesure de nos jours lorsqu'on réalise par exemple électrocardiogrammes ou électroencéphalogrammes. Et la conduction dans les nerfs est bien de nature électrique !*

*Mais attention ! S'il est intéressant de réexaminer les faits à partir de nos connaissances actuelles ("Untel a raison !"), cela n'autorise aucun jugement. On peut tout au plus saluer des deux côtés l'intelligence des hypothèses, les qualités d'imagination, de rigueur, de ténacité qui président aux expériences.*

## La pile de Volta

Jusqu'ici, on l'aura noté, les détecteurs sensibles à l'électricité dite métallique ou animale ne sont pas légion. Volta cherche à obtenir un effet plus intense et fait toutes sortes d'essais. Choix des métaux : "disques de cuivre, ou mieux argent" et "plaques d'étain, ou ce qui est beaucoup mieux, de zinc", choix de "l'humeur": "eau simple, ou, ce qui est beaucoup mieux, eau salée" imprégnant "quelque matière spongieuse". Mais surtout il imagine l'empilement qu'il décrit (en français) dans sa célèbre lettre de mars 1800 à Banks, président de la Royal Society. D'où le nom de "pile" que nous continuons à employer même lorsque nous n'avons affaire qu'à un seul de ses éléments.

"Ayant sous ma main toutes ces pièces en bon état, c'est-à-dire les disques métalliques bien propres et secs et les autres non métalliques bien imbibés (...) d'eau salée, et essuyés ensuite légèrement pour que l'humeur n'en dégoutte pas, je n'ai plus qu'à les arranger comme il convient. Je pose donc horizontalement sur une table ou base quelconque un des plateaux métalliques, par exemple un d'argent, et sur ce premier j'en adapte un de zinc ; sur ce second, je couche un des disques mouillés, puis un autre plateau d'argent, suivi immédiatement d'un autre de zinc, auquel je fais succéder encore un disque mouillé. Je continue ainsi de la même façon, accouplant un plateau d'argent avec un de zinc, et toujours dans le même sens, c'est-à-dire toujours l'argent dessous et le zinc dessus, ou vice-versa, selon que j'ai commencé, et interposant à chacun de ces couples un disque mouillé: je continue, dis-je, à former de ces étages une colonne aussi haute qu'elle peut se soutenir sans s'écrouler. Or, si elle parvient à contenir environ vingt de ces étages ou couples de métaux, elle sera déjà capable, non seulement de (...) charger un condensateur au point de lui faire donner une étincelle, mais aussi de frapper les doigts avec lesquels on vient toucher ses deux extrémités (...)"

### lettre de Volta à Banks

En termes modernes, nous dirions qu'il avait associé en série une vingtaine d'éléments délivrant environ un volt chacun, et subissait ainsi une secousse analogue à celles que produisent les actuelles clôtures électriques des pâturages (une vingtaine de volts) Modeste secousse par rapport aux violentes "châtaignes" que produisaient pour le plus grand amusement des cours princières et salons bourgeois les machines électriques à frottement ! Mais après la "décharge" ces dernières étaient, comme le dit bien ce mot, "déchargées" ! Or, au grand émerveillement de Volta, son édifice persiste à le "frapper" d'un ou de plusieurs petits coups et plus ou moins fréquents suivant qu'on réitère ces contacts". En 1801 Volta présente sa pile devant l'Académie des Sciences en trois séances triomphales, en présence de



Pile de Volta, Musée des Arts et Métiers, Paris

Napoléon Bonaparte qui lui fait décerner une médaille d'or, tandis que physiciens et chimistes à travers l'Europe expérimentent déjà avec des copies ou des variantes du modèle de mars 1800.

Avec cette découverte l'année 1800 marque en effet le début d'une véritable révolution : en quelques années, les piles se perfectionnent, l'électricité sort du cadre des curiosités de salon. Pour la première fois on peut produire non plus d'éphémères décharges électriques mais un courant électrique : après 2 millénaires d'électricité statique, c'est l'ère de l'"électricité dynamique", comme on la nommera au 19<sup>ème</sup> siècle, qui s'ouvre. De 1800 à 1820 les effets chimiques, thermiques, magnétiques, des courants sont découverts et au 19<sup>ème</sup> siècle apparaîtront toutes les applications à l'électrochimie, à la locomotion, aux communications, au chauffage et à l'éclairage, dont nous n'imaginons même plus nous passer....

Volta était loin d'en être conscient. La pile est le fruit d'une sorte de détour d'une quinzaine d'année par la biologie, et loin de prévoir que les "sciences électriques" allaient reprendre leur autonomie, c'est dans ce domaine aussi qu'il voyait l'avenir : "Tous les faits que j'ai rapportés (...) vont ouvrir un champ assez vaste (...) intéressant particulièrement la médecine. Il y en aura pour occuper l'anatomiste, le physiologiste et le praticien"

## La pile après Volta...et sans lui

### Une erreur de Volta

La lecture de la lettre de 1800 (voir l'extrait cité plus haut dans l'encadré) fait apparaître une erreur de Volta. Comme nous l'avons dit plus haut l'élément de pile est le "sandwich" 1<sup>er</sup> métal/ solution aqueuse/ 2<sup>ème</sup> métal. Nos instruments de mesure actuels - [expérience 16](#) - montrent qu'il est source d'une tension de l'ordre du volt<sup>38</sup>. Le zinc en est le pôle négatif. L'empilement revient à mettre en série une vingtaine d'éléments. Mais pour Volta c'est le couple formé des deux métaux accolés qui est à l'origine de la tension électrique : c'est pourquoi il pose à la base de la colonne les deux disques métalliques, et seulement ensuite un "disque mouillé". Pour lui ce dernier n'est là que pour conduire le "fluide électrique" au couple suivant, et pour empêcher que le contact du zinc avec l'argent placé au dessus ne vienne annuler l'effet du contact avec la rondelle d'argent inférieure.

Cette erreur est la conséquence paradoxale de la trop grande sensibilité de son électromètre- condensateur, représenté sur l'illustration ci-contre en fig.5. Cet appareil a effectivement permis à Volta de mettre en évidence la faible charge électrique apparaissant sur un disque de cuivre mis en contact avec un disque de zinc (fig.4). Il y a bien une différence de potentiel de contact entre deux métaux, mais les nouveaux appareils de mesure du 19<sup>ème</sup> siècle montreront qu'elle est beaucoup plus faible que celle du véritable élément de pile !

### Une "action perpétuelle" ?

Toujours dans sa lettre de 1800, Volta comparait la pile aux "batteries électriques" (bouteilles de Leyde ou analogues) utilisées jusque-là : elle ressemble, écrit-il, "aux batteries électriques faiblement chargées" mais "qui agiraient sans cesse (...) et dont la charge après chaque explosion, se rétablirait d'elle-même", "qui jouiraient en un mot d'une action (...) perpétuelle"

<sup>38</sup> Les noms actuels des unités des grandeurs physiques fondamentales rendent hommage à quelques héros de cette histoire : le coulomb est l'unité de charge électrique, le volt est l'unité de tension électrique. Et si aucun nom d'unité ne rend hommage à Galvani, les premiers instruments de mesure du courant ont été des "galvanomètres"...

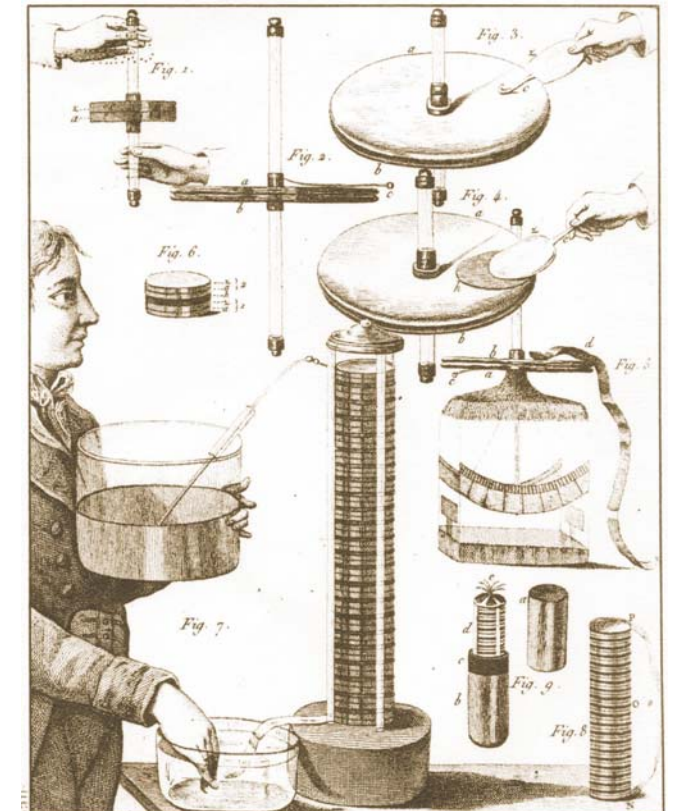


Illustration tirée du compte-rendu des 3 séances de l'Académie tenues en novembre 1801, publié par la "Société Philomathique".

Plusieurs modèles de pile : celle de la fig.7 charge un condensateur, celle de la fig.9 est munie d'un étui pour le transport...

### Non ! La pile Volta s'use si l'on s'en sert !<sup>39</sup>

"Sans cesse" ou durablement ? action "perpétuelle" ou de longue durée ?

La critique vient d'abord des chimistes :

En 1796, Fabbroni avait déjà remarqué que si l'arc métallique des expériences de Galvani était plongé dans l'eau, l'un des deux métaux (en général le zinc) était oxydé. Renvoyant dos à dos électricité animale et électricité métallique, il attribuait les effets électriques observés à une cause chimique. Mais cette intuition étonnamment juste n'eut alors aucun écho. C'est **Humphry Davy**, alors tout jeune chimiste de 22 ans, qui en utilisant dès novembre 1800 la pile de Volta montre qu'elle n'agit que si du zinc s'oxyde, tandis que la

<sup>39</sup> Paraphrase d'une publicité célèbre dans les années 1950 et au-delà " la pile Wonder ne s'use que si l'on s'en sert "

solution subit également une modification chimique. L'idée exprimée par Volta d'une "force électrique motrice" inhérente aux métaux, et qui pousserait perpétuellement de l'un vers l'autre le "fluide électrique" s'expose aussi à une critique plus fondamentale : en France cela fait déjà 15 ans que l'Académie refuse tout mémoire ayant quelque rapport avec le mouvement perpétuel !

Volta défend cependant sa théorie lors des séances de novembre 1801, mais dans le rapport remis en décembre par la commission chargée d'étudier ses travaux "l'action perpétuelle" a disparu.

### Le difficile avènement de la notion moderne de courant électrique

Bien que Volta lui-même ait parlé en 1801 d'un "courant continu de fluide électrique", il ne distingue pas clairement cette notion de celle d'une succession de décharges électriques, et c'est aussi cette notion erronée que retient le rapport de la commission.

C'est là le fruit d'une expérience mal interprétée : la tension électrique qui existe entre les bornes de la pile lorsqu'elle est en circuit ouvert, et que décèle l'électromètre de Volta, s'annule brutalement lorsque ces bornes sont reliées par un bon conducteur. Nos actuels voltmètres confirment cette observation.

Reprenons **l'expérience 16**, en reliant par un fil les deux bornes de l'élément, la tension lue s'annule.

Par analogie avec les machines électrostatiques, on en conclut que la pile est déchargée. Dès qu'on rouvre le circuit, la tension réapparaît, d'où on conclut que la pile, contrairement à ces machines, s'est immédiatement et spontanément rechargée.

L'interprétation correcte - très partielle encore - ne pourra être donnée qu'une vingtaine d'année plus tard. **Hans Christian Oersted**, en 1820, enseigne la physique et s'intéresse comme beaucoup d'autres à la parenté entre magnétisme et électricité, si soigneusement distingués depuis Gilbert. A l'occasion d'un montage de cours, il constate à son grand étonnement, qu'une boussole dévie quand elle est au voisinage d'un fil reliant les bornes de la pile. Et cet effet se prolonge aussi longtemps - n'a lieu que si! - le circuit est fermé, donc dans la situation où Volta croyait la pile déchargée! **André Marie Ampère** constate que l'effet est le même tout au long du circuit. "Quelque chose" y circule : le courant électrique, dont il définit l'intensité comme "débit électrique" et dont il théorise de plus en quelques jours les effets magnétiques. C'est à Ampère qu'on doit, en 1822, la première distinction claire entre les phénomènes qu'il nomme les uns *électrostatiques* et les autres *électrodynamiques*.

Même après 1820 la résistance des concepts hérités de

l'électrostatique continue encore à faire obstacle à la compréhension des circuits électriques : pour la majorité des physiciens il y a une relation d'exclusion entre tension et courant : c'est l'un, ou c'est l'autre ! Pour une analyse correcte des relations entre tensions et intensités dans un circuit, il faudra attendre **Ohm** et **Pouillet**.

*Revenons à notre pile de Volta "chargée" ou "déchargée", analysée à l'aide des lois d'Ohm et de Pouillet.*

*En circuit ouvert elle ne délivre aucun courant, la tension  $U$  entre ses bornes est maximale :  $U = E$ .*

*Lorsqu'on ferme le circuit par un conducteur parfait les deux bornes sont ramenées au même potentiel électrique, la tension s'annule :  $U = 0$ , mais la pile délivre alors un courant maximal, le courant de court-circuit  $I_{CC} = E/r$ , où  $r$  est la résistance interne de la pile. (Il n'est pas recommandé de court-circuiter une pile usuelle du commerce, de résistance interne faible : le fort courant  $I_{CC}$  la détériorerait rapidement !)*

*Et les situations intermédiaires, lorsque les bornes sont reliées par un conducteur de résistance  $R$  non nulle ?*

*Il prend alors une valeur inférieure à  $I_{CC}$  :  $I = E/(R+r)$ , tandis que la tension  $U$  aux bornes de la pile chute par rapport à  $E$  sans s'annuler :  $U = E - rI$ . Cette tension est aussi celle appliquée au conducteur :  $U = RI$ .*

*Si l'on est réfractaire aux formules, on se contentera de retenir l'idée de "résistance interne" de la pile. Elle explique une importante constatation empirique de Volta : la pile "marche mieux" si la solution choisie est "eau salée" plutôt que "eau simple". Cela ne change pas grand-chose à la tension  $U = E$  en circuit ouvert, mais si la solution est mauvaise conductrice (eau simple) la résistance interne est très grande et, même en court-circuit, la pile ne peut débiter qu'un courant très faible.*

### Piles dans toute l'Europe !

Ces difficultés théoriques n'empêchent pas de construire partout des "piles" qui souvent n'en sont plus. Ce sont plutôt des batteries de flacons, ou bien des auges, où une solution remplace les "disques mouillés" de Volta et d'où émergent les électrodes métalliques.

Et on voit grand : Davy se fait construire dès 1802 un modèle à auges de 400 éléments. Quand il sera usé, en 1813, la Royal Institution le remplace par un modèle différent, de 2000 éléments, mieux que celui de 600 éléments dont Napoléon vient de doter l'Ecole Polytechnique !

C'est que les découvertes et les applications - dans des domaines tout autres que ceux prévus par Volta - se succèdent très rapidement.



Fig. 555. — Pile à auge.

Drion et Fernet, éd. 1893

### L'électrolyse, l'arc électrique...

Dès 1800 Carlisle et Nicholson avaient constaté, en interposant un tube rempli d'eau dans le circuit alimenté par la pile, un dégagement d'hydrogène, qu'ils attribuent à la décomposition de l'eau. En perfectionnant le dispositif<sup>40</sup> (électrodes inattaquables disposées sous des éprouvettes graduées) ils recueillent deux volumes d'hydrogène sur une électrode, pour un volume d'oxygène sur l'autre. C'est l'électrolyse de l'eau, l'inverse de sa synthèse à partir d'hydrogène et d'oxygène (réalisée peu de temps auparavant par Cavendish) qui avait permis à Lavoisier d'en établir la composition.

On peut aussi électrolyser des "terres" fondues : c'est ainsi que Davy découvre en 1807 une série de métaux jusque là inconnus, notamment sodium et potassium.

Humphry Davy avait très tôt perçu l'origine chimique de l'électricité produite par la pile, avant d'en étudier à l'inverse les effets chimiques. Cela le conduisit à prédire avec une étonnante justesse : "Attraction chimique et électrique sont produits par la même cause [mais pour bien les comprendre il faudrait] des vues entièrement nouvelles sur les actions corpusculaires" C'est bien en effet la physique moderne de l'atome qui a établi la nature électrique de la liaison chimique.

De leur côté c'est également à des découvertes dans le domaine chimique que Gay-Lussac et Thénard utilisent l'installation de l'Ecole Polytechnique.

Et les effets thermiques ? Pour nous, ils semblent les plus évidents : chauffage électrique, éclairage à incandescence. Pourtant malgré quelques fusions ou combustions spectaculaires de métaux réalisées avec la pile de Davy, on s'y attarde peu. Peut-être du fait de l'analogie trompeuse avec les expériences des années 1750, où la décharge de batteries de bouteilles de Leyde provoquait la volatilisation de filaments métalliques : fusions ou combustions rompent le

<sup>40</sup> Les cuves à électrolyse que nous utilisons en classe en sont la version rudimentaire. On les appelait encore il y a peu "voltamètres". On pouvait en effet mesurer la quantité d'électricité débitée par la pile par les volumes de gaz dégagés.

circuit, et cela n'aide pas à ce que s'impose l'idée d'un courant permanent susceptible d'entretenir un dégagement thermique régulier.

En revanche c'est encore Davy qui découvre l'arc électrique en 1808, source d'une lumière éblouissante, qui jaillit dans l'intervalle entre deux charbons reliés aux pôles de sa batterie de 2000 éléments. Les électrodes de charbon s'usent assez rapidement, et sans un mécanisme les rapprochant régulièrement, l'arc est peu durable et peut donc difficilement servir à un éclairage continu. Il y aura cependant en 1840 quelques tentatives d'éclairage public à arc en France.

### Piles d'hier et d'aujourd'hui

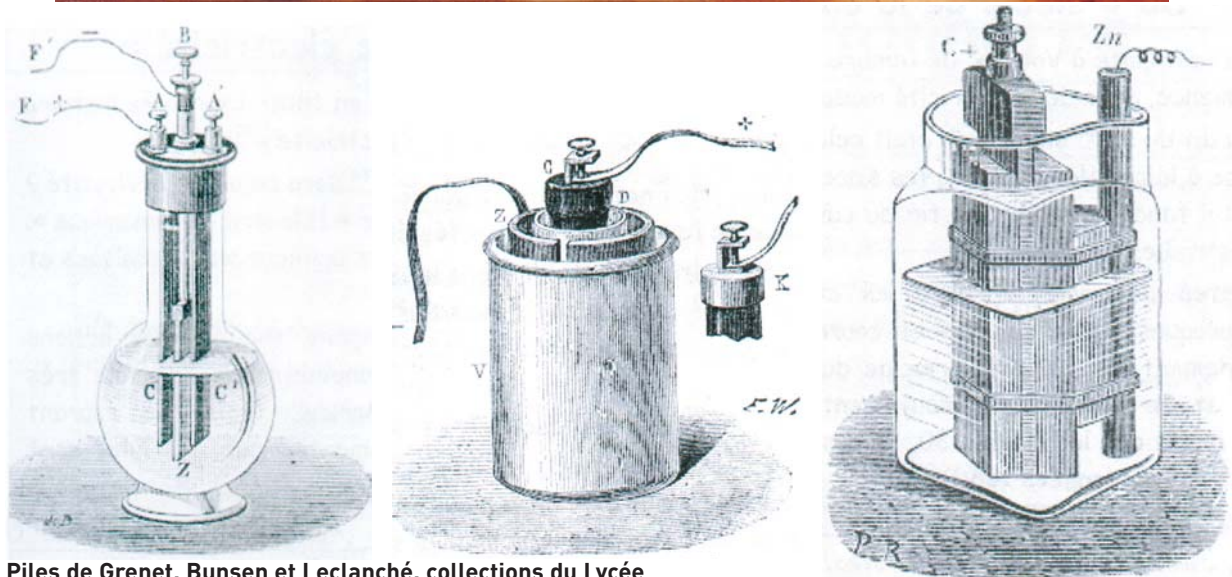
La pile de Volta a des défauts, qui deviendront rédhibitoires lorsqu'on s'intéressera à des applications demandant un courant constant. Ses électrodes sont modifiées par son fonctionnement, ce qui fait chuter l'intensité qu'elle délivre à un circuit. Il faut un temps de repos pour qu'elle retrouve ses propriétés initiales. Pourquoi cela ?

Comme l'avait déjà pressenti Davy l'électricité produite par la pile résulte d'une réaction chimique d'oxydoréduction. Le pôle négatif (zinc) est un métal très réducteur, tandis qu'au pôle positif un oxydant est réduit. Dans le cas de Volta ce dernier est l'eau, et sa réduction au contact de la plaque de cuivre ou d'argent produit un dégagement d'hydrogène modifiant cette électrode au détriment du courant débité. Dans tous les modèles de pile apparus après Volta, c'est donc le choix d'un oxydant plus approprié qui fait la différence : solution de sulfate de cuivre avec Antoine Becquerel (1829)<sup>41</sup>, dichromate de potassium avec Grenet, acide nitrique dans l'élément Bunsen (1843), dioxyde de manganèse dans l'élément Leclanché (1868).

Nos piles usuelles "1,5 volts" sont des variantes de la pile Leclanché. Par rapport au modèle ancien, une différence importante sur le plan pratique est que la solution conductrice interposée entre le zinc et le réactif oxydant a été gélifiée, ce qui rend le maniement et le transport plus commodes !

*La théorie correcte de toutes ces piles a suivi très tardivement leur découverte empirique. Le détail des réactions chimiques est souvent complexe. Très sommairement : dans une réaction d'oxydoréduction le réducteur cède des électrons à l'oxydant. Toute l'astuce de la pile est d'empêcher que cela se fasse par contact direct entre les réactifs. Les électrons que cèdent les atomes de zinc, métal réducteur constituant l'un des pôles de la pile, doivent donc emprunter le circuit extérieur pour être cédés à l'oxydant situé à l'autre pôle. La réaction se produit donc uniquement si le circuit est fermé - la pile ne s'use en principe que si*

<sup>41</sup> Élément de pile à deux solutions, toujours utilisé dans l'enseignement en lycée sous le nom de pile Daniell. C'est l'ion  $Cu^{2+}$  de la solution qui est l'oxydant. Antoine Becquerel est le grand-père d'Henri Becquerel, prix Nobel en 1903 pour sa découverte de la radioactivité.



Piles de Grenet, Bunsen et Leclanché, collections du Lycée

*L'on s'en sert - et elle y entretient le courant désiré. Les atomes de zinc qui ont cédé des électrons se sont transformés en ions, solubles dans le milieu gélifié : lorsque l'on décortique une pile saline usée, on constate que le cylindre de zinc qui entourait ce milieu est fortement rongé.*

Il faudra attendre la fin du 19<sup>ème</sup> siècle pour que d'autres générateurs électriques viennent concurrencer sérieusement les diverses piles (et leur version "rechargeable" l'accumulateur, inventé en 1859 par Planté). Ce sont les alternateurs et dynamos, qui convertissent en énergie électrique non plus de l'énergie chimique mais de l'énergie mécanique. En 1888 Tesla construit des ensembles alternateurs - transformateurs - moteurs qui préfigurent nos actuels réseaux d'électricité.

Avec ces derniers l'usage des piles deviendra relativement marginal pendant une bonne partie du 20<sup>ème</sup> siècle, avant de connaître un nouvel essor avec l'électronique portable de ces dernières décennies.

#### Gloire de Volta, ou gloire de la pile ?

*"Cette masse en apparence inerte, cet assemblage bizarre est, quant à la singularité des effets, le plus merveilleux instrument que les hommes aient jamais inventé, sans en excepter le télescope et la machine à vapeur" écrivait Arago, en 1831.*

Volta a 55 ans lors de l'invention de la pile. Dès lors il ne cessera d'être comblé d'honneurs et d'avantages par Napoléon. Après la chute de ce dernier il s'adaptera sans difficultés au retour des autrichiens. Il meurt à 82 ans. Cent ans après, en 1927, un "temple voltien" est édifié à Côme.

On serait pourtant tenté de dire que l'invention, justement célébrée par Arago, dépasse son auteur. Volta - âgé il est vrai - n'a plus aucune part dans les découvertes qui se succèdent après 1800, et l'on a vu que même l'interprétation de sa découverte lui échappe largement. Expérimentateur et inventeur de génie, il est resté à l'écart des développements théoriques et mathématiques de l'électricité.

## Du "siècle de la curiosité" à l'ère de la "fée électricité"

De l'antiquité à Volta", de l'ambre frotté à la pile : notre histoire s'arrête en 1800. Une autre histoire commence, celle de l'électricité moderne, celle de l'avènement de la "fée électricité"<sup>42</sup>.

On a dit du 18<sup>ème</sup> siècle qu'il était celui de la curiosité. Peut-on dire que le 19<sup>ème</sup> sera celui de l'efficacité ? Grâce à la pile, les découvertes s'accroissent dans le domaine tout nouveau de "l'électricité dynamique". Mais il faudra attendre la fin du siècle pour que s'accroissent à leur tour les applications techniques et industrielles.

**Oersted** découvre en 1820 les effets magnétiques du courant et Ampère théorise les actions réciproques entre aimants et courants. La réalisation des premiers galvanomètres en découle très rapidement, ainsi que le principe du moteur électrique avec la "roue de Barlow" (1822) : un courant permet de produire du mouvement. Mais si des moteurs électriques alimentés par des piles sont construits dès les années 30, ils restent des curiosités rares : les réalisations pratiques sont beaucoup plus tardives (années 1880).

En 1831 **Faraday** découvre le phénomène d'induction magnétique, qui permettra de s'affranchir de la pile : un "courant induit" apparaît dans un bobinage proche d'un circuit alimenté par une pile lorsqu'on ouvre et ferme ce circuit. Faraday imagine alors de remplacer ce circuit "inducteur", source d'un "champ magnétique" variable, par le mouvement d'un aimant au voisinage du bobinage. Le courant induit apparaît encore ! C'est le principe des dynamos et alternateurs. Mais là aussi les réalisations pratiques attendront les années 1870 (dynamo de Gramme) et 80 (alternateurs de Tesla).

Il s'écoule aussi quelques dizaines d'années entre la réalisation des premiers prototypes de lampe à incandescence, vers 1840, et le passage au stade industriel, avec l'ampoule électrique d'Edison (1880). L'application de l'électricité aux communications commence avec les transmissions par fil : le télégraphe, avec le système Morse (1844), puis le téléphone, mis au point et breveté par Bell en 1876. Une découverte fondamentale conduira à la révolution de la "transmission sans fil" (T.S.F. : ainsi nommait-on les premières radios) : **Maxwell** fait la théorie des ondes électromagnétiques en 1865, élucidant du même coup la nature de la lumière. C'est seulement une vingtaine d'années plus tard qu'une manifestation expérimentale - émission et réception d'ondes électromagnétiques autres que la lumière - est obtenue par Hertz. Ces ondes permettent de véhiculer des messages

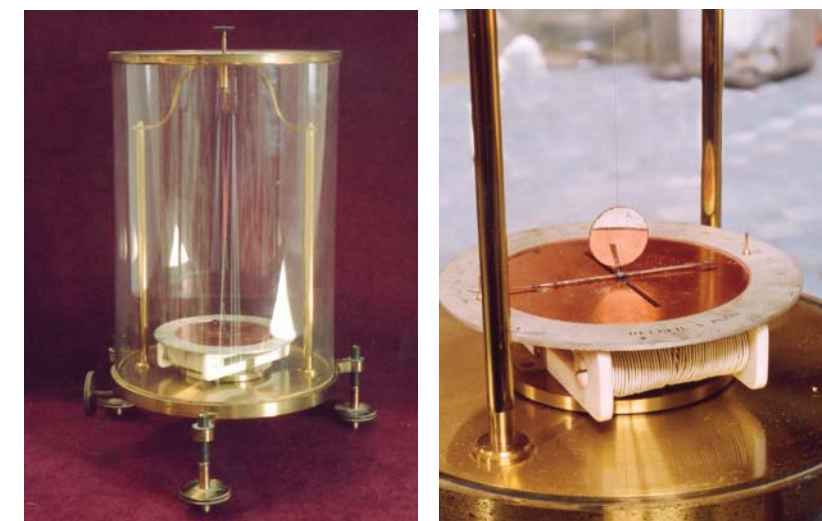
- les premiers messages transatlantiques "sans fil" autour de 1900 - puis des sons : peu avant 1914, les premières émissions musicales. La radio connaît un très rapide développement entre 1915 et 1930.

Electrotechnique industrielle, locomotion, éclairage, transmissions : la "fée électricité" est dès lors triomphante et Dufy lui dédie, lors de l'exposition internationale de 1937, une gigantesque peinture de 600 m2.

Fée uniquement bienfaisante ? On s'inquiète aujourd'hui de sa voracité : elle ne se contente plus de consommer les quelques disques métalliques de Volta. Les centrales électriques classiques brûlent charbon, gaz naturel ou fioul, et rejettent du gaz carbonique, amplifiant "l'effet de serre". Solution : la pile encore ? Mais d'un autre type : "pile atomique" fut en effet le nom donné au premier réacteur nucléaire, en 1942. C'est encore un empilement, mais de barreaux d'uranium cette fois. Et au lieu d'une réaction chimique, c'est une réaction nucléaire qui s'y déroule, beaucoup moins gourmande en "combustible", mais productrice de déchets radioactifs<sup>43</sup>.

Comment bénéficier des usages de l'électricité, sans les inconvénients de sa production ?

"Mais - aurait dit Kipling - ceci est une autre histoire". Qui reste à écrire !



Le galvanomètre de Nobili (1825) est sensible à des courants très faibles : il utilise l'action du courant sur une aiguille aimantée (découverte d'Oersted) suspendue à un fil.

<sup>42</sup> Cette histoire étant l'objet de conférences et reconstitutions d'expériences historiques à l'aide des collections du lycée de Rennes, à l'initiative de l'Amelycor.

<sup>43</sup> De plus contrairement à la pile chimique qui convertit directement de l'énergie chimique en énergie électrique, l'énergie nucléaire est d'abord convertie en énergie thermique, dont un tiers seulement peut être converti en énergie électrique...

## Annexes

### Orages, foudre, tonnerre...

"Que se passe-t-il à l'intérieur d'un orage ? Nous allons le décrire, dans la mesure où cela est connu. En pénétrant ce phénomène merveilleux de la nature réelle (...) nous découvrons que nous n'y connaissons pas grand-chose. Et pourtant c'est passionnant. Quiconque s'est trouvé près d'un orage en a éprouvé de la joie ou de la frayeur ou tout au moins une certaine émotion. Et dans la nature, là où nous éprouvons une certaine émotion, on trouve qu'il lui correspond en général une complexité et un mystère..."

(Richard Feynman<sup>44</sup>, "l'électricité dans l'atmosphère", cours de physique, Interéditions 1979)

### De l'étincelle à la foudre, quelques chiffres pour impressionner le lecteur !

Nous avons vu comment Benjamin Franklin a mis en évidence l'identité de nature entre la foudre et les étincelles des expériences d'électrostatique.

Mais les ordres de grandeur ne sont pas les mêmes : lors d'un orage,

- il peut exister une tension de plusieurs centaines de millions de volts entre nuage et terre (mille fois plus que les hautes tensions les plus élevées transportées par E.D.F.) !

- Le courant électrique dans l'éclair peut atteindre (très brièvement il est vrai) des intensités de quelques dizaines de milliers d'ampères (mille fois l'intensité maximale admise par le disjoncteur protégeant nos installations domestiques)

- Il en découle des températures pouvant atteindre jusqu'à 30000 °C : cet échauffement très brutal est une des causes de l'intense luminosité de l'éclair. C'est

aussi la cause d'une brusque dilatation de l'air le long de l'éclair : "l'onde de choc" qui en résulte se propage dans l'air à la vitesse du son, soit environ un kilomètre en 3 secondes : c'est le tonnerre.

- Dans certains systèmes orageux, des éclairs inter et intra nuageux peuvent atteindre une extension horizontale d'une centaine de kilomètres tandis que le développement vertical des éclairs entre nuage et terre ("coups de foudre") est généralement compris entre 2 et 10 km.

### Mais d'où vient l'électrification des nuages d'orage ?

Que sait-on sur l'éclair ? Comment la foudre frappe-t-elle et comment s'en protéger ? Que nous apprennent les grondements ou les claquements du tonnerre ?

Toutes ces questions ont fait l'objet en novembre 2003 d'un "jeudi d'Amelycor", à la suite d'une belle exposition présentée par l'Espace des Sciences. et ont donné naissance à un "cahier d'Amelycor", à commander auprès de l'association.

Nous avons aussi la chance de disposer en France des travaux d'un inlassable "traqueur d'orages", Alex Hermant, qui a ainsi enregistré à l'aide d'un caméscope plusieurs milliers d'éclairs. Il est l'auteur de plusieurs publications et notamment : Traqueur d'orages, Nathan 2001, 256 pages. On y trouvera un très grand nombre de superbes clichés : nuages pré orageux et orageux, coups de foudre et éclairs intranuageux ou internuageux, ainsi que textes et schémas explicatifs. On pourra aussi visiter son "musée de la foudre", proche d'un des sites les plus foudroyés de France<sup>45</sup> ...

Dans "l'écho des colonnes" (Bulletin de l'association Amelycor) n°16 (mai 2003)

### D'un usage insolite de la "pile Volta" d'où l'on conçoit la nécessité de penser la formation des maîtres

Connaissant de longue date l'appareil de Volta préservé dans les collections de Physique, je n'ai pu résister à l'envie de vous livrer ce témoignage de Jules Simon<sup>1</sup> (1814-1896).

Auteur, entre autres ouvrages, de "La liberté de penser"(1870), Jules Simon fut ministre de l'Instruction publique dans le gouvernement de Défense Nationale et le premier ministre Thiers (1870-1871)

A. Thépot

"Nos régents, qui presque tous étaient prêtres, savaient parfaitement le latin. Ils savaient peut-être aussi, tant bien que mal un peu de théologie. Je puis attester qu'ils ne savaient pas autre chose. On nous donna en 1829 un régent de physique. On n'avait pas entendu parler de ce genre d'études au collège de Vannes depuis 1789. M. Merpaut, qu'on chargea de cet enseignement, était comme le collègue : il n'avait jamais entendu parler de cela. Il acheta un vieil exemplaire de la Physique de l'abbé Nollet<sup>1</sup>. "Je ne le comprends pas, nous dit-il, mais nous le lirons ensemble, et peut-être en nous aidant mutuellement, parviendrons-nous à savoir ce qu'il veut dire". Nous n'y parvînmes pas. Nous mîmes au pillage deux armoires contenant quelques instruments de physique surannés et beaucoup de substances diverses. Nous mettions un grand zèle à mélanger les fioles l'une avec l'autre sous les yeux de M. Merpaut, pour voir ce qui en résulterait. Nous finîmes par jouer aux palets pendant la classe avec les disques d'une pile Volta. Je dois dire, pour rendre hommage à la vérité, que M. Merpaut avait un jeu très bruyant. Le professeur de rhétorique, notre voisin, se plaignit du tapage. M. Merpaut fut magnifique : "Allez dire à votre maître que nous sommes ici pour étudier les lois de la nature et que nous lui laissons pleine liberté de faire tout ce qu'il voudra des lois de la rhétorique<sup>2</sup>."

<sup>1</sup> L'abbé Nollet titulaire de la chaire de Physique au Collège de Navarre avait publié son manuel en 1743 ! On trouve parmi les instruments anciens du lycée " le double cône de Nollet " instrument paradoxal dont G. Chapelan nous a livré le secret dans le n° 5 de l'Echo des colonnes

<sup>2</sup> On mesure ici l'influence de Mirabeau ; sur l'inoubliable régent ou sur le mémorialiste ? là est la question.

<sup>1</sup> Jules Simon : Le collège de Vannes en 1830, La revue illustrée de Bretagne et d'Anjou, 1886 ; cité dans l'excellent livre de la Collection ARCHIVES Gallimard-Julliard : Du Collège au Lycée, par M. M. Compère, 1985.

L'article qui suivait mettait le lecteur en garde contre ce déplorable exemple :

### Du bon usage de la pile de Volta

(...) Que nul ne soit tenté de profaner, au profit d'un jeu pratiqué par quelques tribus sauvages du grand Ouest, les disques de cette pile que nous avons réussi jusqu'à présent à conserver, sans un perdre un seul, dans nos collections, et que chaque année nous présentons à la génération montante comme le symbole de l'entrée de l'Humanité dans l'ère de l'Electricité !

Sans en perdre un seul ? Quoique... Regardez la photographie : certes pas un des disques (qui a dit "palets"?) de cuivre et de zinc alternés n'y manque.



Mais pourquoi alors la "pile" - le mot est resté depuis que Volta imagina cet empilement - ne monte-t-elle pas jusqu'au sommet de la colonne ? C'est que les disques de "carton ou autre matière spongieuse" que Volta intercalait entre cuivre et zinc ont disparu.

A nous de les reconstituer pour une prochaine présentation publique...

## Index chronologique des principaux noms cités.

<b>Thales</b> de Milet	624? - 548? av. J.C.
<b>Platon</b>	428 - 347 av. J.C
Pierre de <b>Maricourt</b>	13ème siècle
Nicolas <b>Copernic</b>	1473 - 1543
William <b>Gilbert</b>	1540 - 1603
Johannes <b>Kepler</b>	1571 - 1630
René <b>Descartes</b>	1596 - 1650
Otto <b>Von Guericke</b>	1602 - 1686
Evangelista <b>Torricelli</b>	1608 - 1647
Robert <b>Boyle</b>	1627 - 1691
Isaac <b>Newton</b>	1643 - 1727
Francis <b>Hauksbee</b>	1666? - 1713
Stephen <b>Gray</b>	1666 - 1736
René-Antoine Ferchault de <b>Réaumur</b>	1683 - 1757
Pieter Van <b>Musschoenbroek</b>	1692 - 1761
Charles-François de Cisternay <b>Dufay</b>	1698 - 1739
Jean- Antoine <b>Nollet</b>	1700 - 1770
Thomas-François <b>Dalibard</b>	1703 - 1779
Benjamin <b>Franklin</b>	1706 - 1790
Robert <b>Symmer</b>	1707 - 1763
Georges-Louis Leclerc de <b>Buffon</b>	1707 - 1788
Louis- Guillaume <b>Le Monnier</b>	1717 - 1799
Franz <b>Aepinus</b>	1724 - 1802
Lazzaro <b>Spallanzani</b>	1729 - 1799
Henry <b>Cavendish</b>	1731 - 1810
Joseph <b>Priestley</b>	1733 - 1804
Charles-Augustin <b>Coulomb</b>	1736 - 1806
Luigi <b>Galvani</b>	1737 - 1798
Antoine Laurent de <b>Lavoisier</b>	1743 - 1794
Alessandro <b>Volta</b>	1745 - 1827
André Marie <b>Ampère</b>	1775 - 1836
Hans Christian <b>Oersted</b>	1777 - 1851
Humphry <b>Davy</b>	1778 - 1829
Georg Simon <b>Ohm</b>	1789 - 1854
Claude <b>Pouillet</b>	1790 - 1868
Michael <b>Faraday</b>	1791 - 1867
James Clerk <b>Maxwell</b>	1831 - 1879
Joseph John <b>Thomson</b>	1856 - 1940

## Quelques dates repères, jusqu'à la pile de Volta

<b>Antiquité grecque :</b>		ambre frotté (" <b>elektron</b> ") et pierre de <b>Magnésie</b> (aimant)
<b>Chine, 3ème siècle ( ? ) :</b>		<b>la boussole</b>
<b>1269</b>	<b>Pierre de Maricourt</b>	<b>attraction</b> ou <b>répulsion</b> entre <b>pôles d'aimants</b>
<b>1600</b>	<b>William Gilbert</b>	" <b>De Magnete</b> ", distinction des domaines magnétique et " <b>électrique</b> " (apparition du mot)
<b>1687</b>	<b>Isaac Newton</b>	les " <b>Principia</b> " : <b>loi de la gravitation universelle</b>
<b>1705</b>	<b>Francis Hauksbee</b>	<b>Première "machine électrostatique"</b> (à frottement)
<b>1729</b>	<b>Stephen Gray</b>	<b>Conducteurs et isolants</b>
<b>1733</b>	<b>Ch.-A. de Cisternay Dufay</b>	<b>Les deux espèces d'électricité</b>
<b>1745 - 46</b>	<b>Von Kleist et Pieter van Musschoenbroek</b>	<b>La bouteille de Leyde</b>
<b>mi - 18ème</b>	<b>Abbé Nollet</b>	<b>Expériences-spectacle</b> , théorie des <b>affluences</b> et <b>effluences</b>
<b>1746</b>	<b>Le Monnier</b>	<b>Tentative de mesure de la "vitesse de l'électricité"</b>
<b>1747 - 1750</b>	<b>Benjamin Franklin</b>	<b>Charges électriques positives et négatives, effet des pointes, nature électrique de la foudre</b>
<b>1759</b>	<b>Robert Symmer</b>	<b>Théorie des deux fluides électriques</b>
<b>1771</b>	<b>Henry Cavendish</b>	<b>Force électrique en <math>1/d^2</math> ? potentiel électrique</b>
<b>1785 à 88</b>	<b>Charles Coulomb</b>	<b>Balance de torsion</b> appliquée à l'étude de la <b>loi en <math>1/d^2</math> de la force électrique</b>
<b>1791</b>	<b>Luigi Galvani</b>	<b>Hypothèse de "l'électricité animale"</b> (publication des observations sur la contraction des cuisses de grenouille)
<b>1796 - 1800</b>	<b>Alessandro Volta</b>	<b>La pile</b>

## Bibliographie :

*Pour les conférences données de septembre à novembre 2003 au Lycée Emile Zola, et qui sont à l'origine de ce texte, je n'ai pu mener malheureusement aucune recherche personnelle sur les sources historiques, si passionnantes que puissent être les écrits de Dufay, de l'Abbé Nollet, de Benjamin Franklin, de Galvani ou Volta ... et je me suis donc servi de divers travaux d'historiens des sciences. Principalement :*

**Christine Blondel : Histoire de l'électricité** ("Explora", Pocket - Cité des sciences et de l'industrie, 1994). J'ai emprunté largement - plan, contenu, iconographie d'expériences historiques - à ce livre clair et documenté.

**Jean Pierre Maury : une histoire de la physique sans les équations.** (Vuibert 2ème éd. 2002.). Livre excellent, destiné au grand public.

**Emilio Segré : les physiciens classiques et leurs découvertes** (Fayard 1983) histoire très documentée écrite par un prix Nobel de physique.

**Histoire générale des Sciences** (sous la direction de René Taton, P.U.F.) : ses quatre gros tomes, publiés en 1958, restent la Bible...

**Leprince-Ringuet : L'aventure de l'électricité** (Flammarion, 1983)

**Gérard Borvon : De Dufay à Ampère (...). Un moment de l'histoire de l'électricité.** Article dans : Bulletin de l'Union des Physiciens (janv. 1994)

**Jean Rosmorduc : aperçus sur l'histoire de l'électricité et du magnétisme.** Article dans : Bulletin de l'Union des Physiciens (été 1987)

*Pour approfondir davantage un moment particulier de cette histoire de l'électricité et la biographie d'un de ses acteurs, on lira utilement :*

- **les "Cahiers de Science et Vie"** suivants :

**Benjamin Franklin** (n° 28, août 95), sa biographie, sa théorie des quantités d'électricité positives et négatives, et bien sûr le paratonnerre...

**La mesure de la force électrique** (n°26, avril 95), cahier consacré à la découverte par Coulomb de la loi des forces électriques qui porte son nom, mais aussi aux autres applications de la "balance de Coulomb" et à un bel article sur la pile et "les deux versants de l'électricité" : statique et dynamique.

- **La Revue du Musée des Arts et Métiers** n° 31, décembre 2000, Volt(A)

- **Massain : Physique et Physiciens** (Magnard 1966 ). Les pages concernant Volta donnent d'importants extraits de sa lettre de 1800

*Nous nous sommes servi également, pour suivre l'évolution au 19ème siècle de l'enseignement de l'électricité et des instruments servant à cet enseignement dans les lycées, du "traité élémentaire de physique" de Ganot (10ème édition, vers 1880, et 23ème, vers 1905) et de celui de Drion et Fernet (éditions de 1869 et 1893).*