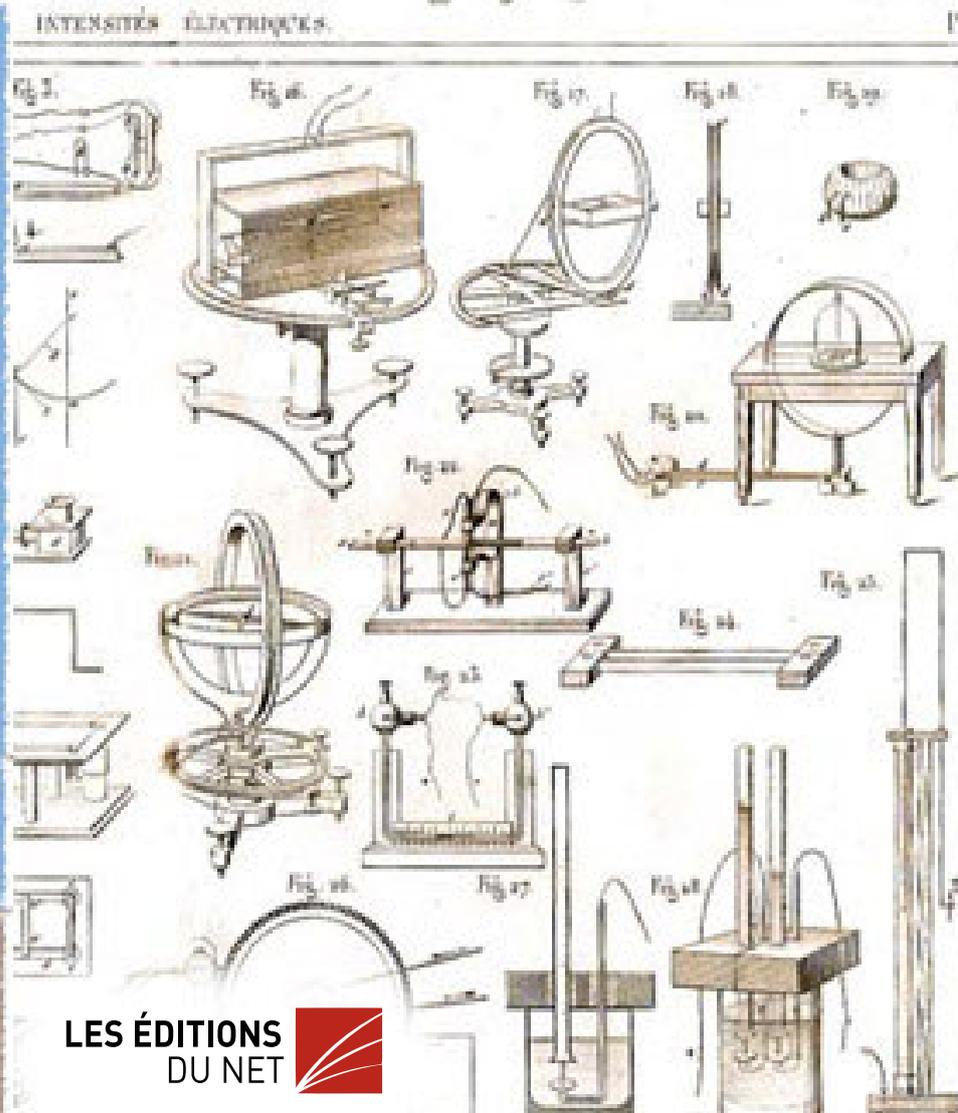
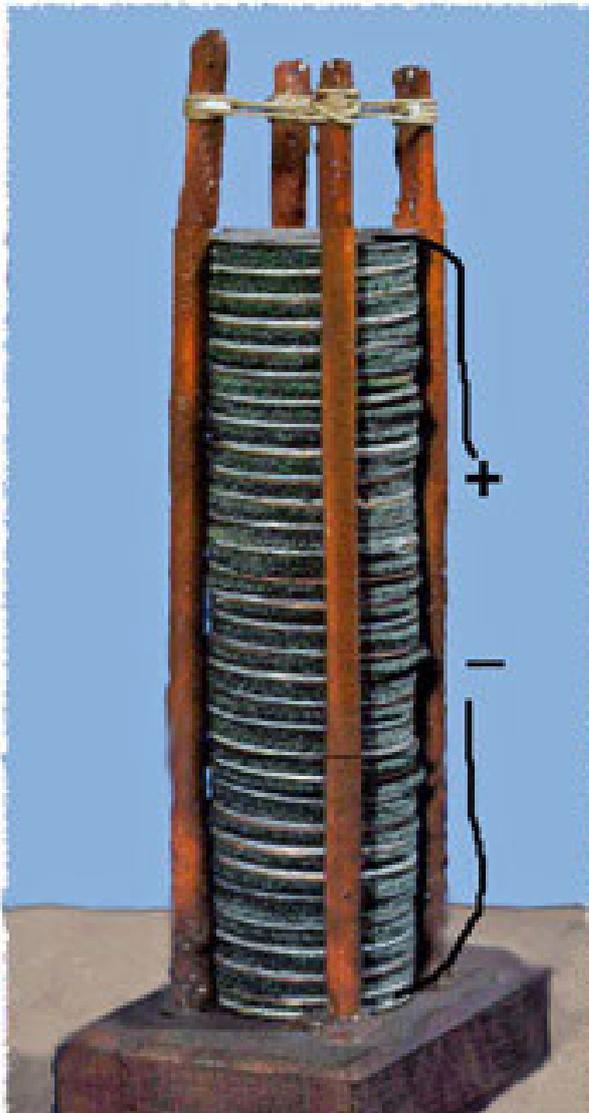


ANDRÉ DUCLUZAUX

L'ÉLECTRICITÉ : DÉCOUVREURS ET INVENTEURS

Tome I - Défricheurs de l'inconnu



André Ducluzaux

L'électricité

Découvreurs et Inventeurs

Cent aventures de
physiciens, autodidactes,
ingénieurs, techniciens

Tome I Défricheurs de l'inconnu

LES ÉDITIONS DU NET
22, rue Édouard Nieuport 92150 Suresnes

Du même auteur

La mesure électrique au temps des pionniers
ed RGE -1990

Une histoire pour l'avenir - Merlin Gerin - 1920 -1992
(sous la direction de) ed. Albin Michel - 1992

La Houille blanche de Belledonne en Romanche
Aristide Bergès du mythe à la réalité
ed. de Belledonne - 1998

Histoires d'industries en Dauphiné
(collectif) ed. APHID - 2002

En couverture

Pile de Volta – 1800 – Reproduction-MNST

Le premier générateur d'électricité dynamique

« Cette masse en apparence inerte, cet assemblage bizarre est, quant à la singularité de ses effets, le plus merveilleux instrument que les hommes aient jamais inventé ... sans en excepter le télescope et la machine à vapeur. »

François Arago - 1833

À Quentin, Matthieu, Eugénie, Mélanie, Héloïse, Hugo,
pour les inciter à mieux comprendre, par son histoire,
leur futur métier, technique, commercial ou médical.

La jeunesse d'aujourd'hui ne respecte plus les maîtres.
Ce manque de respect ne peut pas lui être reproché,
car, dans l'étude des sciences
on ne l'initie plus à l'histoire des découvertes.
H. de Parville -1872

Merci à Michel Serres et ceux qui l'accompagnent.
Ils m'ont révélé l'histoire des sciences,
cette autre culture, scientifique et technique, délaissée en France,
indispensable pour comprendre notre *âge électrique*.

Il n'y a de progrès humains
que si les efforts continus des générations s'additionnent.
La civilisation dont nous jouissons n'est que la somme
des résultats du labeur des siècles écoulés.
S. Smiles -1863

Sommaire

Tome I – Défricheurs de l'inconnu

Au lecteur	11
1 - L'électricité	21
Essai de définition – Vecteur d'énergie, vecteur d'information.	
2 – Magnétisme et électricité statique	27
Préhistoire, les chinois, Thalès, Gilbert – Le XVIII ^e l'électrostatique La bouteille de Leyde – Le feu du ciel, paratonnerre de Franklin – Expériences Machines électrostatiques – Balances de Coulomb.	
3 - L'électricité dynamique – l'électrochimie	55
Galvani croit découvrir l'électricité animale – Volta, l'électricité de contact Longue controverse – L'invention mûrit – La pile – Antériorité Parthe La pile de Volta génère un fluide inconnu – Il décompose l'eau.	
4 - L'électromagnétisme	77
Oersted découvre l'action du courant sur un aimant – Ampère démontre que le magnétisme est créé par l'électricité – Formule de l'électrodynamique Arago réalise un aimant électrique – Expériences – Principe du moteur.	
5 – L'induction	97
Arago découvre le magnétisme de rotation – Faraday l'explique par la création d'un courant induit par la variation du magnétisme. Principe du générateur électromécanique.	
6 - Lois et théories	113
La nature supposée du courant – Le conflit électrique Lois de l'électrocinétique, Pouillet, Ohm, Kirchoff Conservation de l'énergie – Les théoriciens – Supraconductivité.	

Tome II – Générer l'électricité

Tome III – Et la lumière fut

Tome IV – Vecteur d'énergie

Tome V – Vecteur d'information

Le sommaire général des 5 tomes figure en fin de livre.

Revois dans le texte :

(k) = voir figure repère k

(5) = voir complément 5 en fin de chapitre

(II-4) = voir tome II, chapitre 4

Au lecteur

Ce livre, genèse des découvertes et des inventions, constitue peut-être une vingt sixième Histoire de l'électricité, depuis la première, celle de Joseph Priestley en 1771. Alors, qu'apporte-t-il d'autre par rapport aux précédents ?

Pourquoi ? Pour qui ? Comment ?

Lecture que peuvent éviter les aventuriers intellectuels, préférant la surprise de la découverte au fil des pages, aux sentiers trop balisés.

Pourquoi ce livre ?

À l'éveil de leur intelligence, les enfants ont un besoin inné de comprendre leur environnement, avec l'incessant « *pourquoi* » qui agace tant les parents. Il se dilue malheureusement trop chez l'adulte, bridé par une formation initiale, se contentant trop souvent d'apprendre plus que de comprendre. Sans cette passion, si personne n'avait cherché à comprendre la Nature, il n'y aurait pas eu de sciences, seulement des techniques empiriques.

Comprendre l'émergence de l'une des sciences physiques, l'électricité, et des techniques qui l'ont mise au service de l'homme par l'industrie, tel est l'objectif central de cette histoire.

Il retrace l'étonnante aventure intellectuelle et matérielle des pionniers, découvreurs et inventeurs de Thalès au transistor. Les premiers cherchaient à soulever un coin du voile cachant cet univers infini des connaissances, les seconds s'appliquaient à les traduire pratiquement en machines et objets utiles, souvent par passion, ou pour gagner leur vie, en facilitant celle de leurs contemporains.

Cette ambition m'a conduit à ne pas rééditer une histoire limitée à un catalogue chronologique de faits, dates, événements, personnages et machines. Ce livre ne se propose pas de s'ajouter à d'autres histoires essentiellement descriptives, mais d'en être complémentaire sur deux aspects :

– D'abord, approfondir l'histoire des longs et laborieux processus qui ont déclenché chacune des découvertes et inventions de l'électricité, analyser leurs causes, puis leurs conséquences, pour mieux en percevoir l'originalité et le mystère, des jalons pour le chercheur d'aujourd'hui.

– Ensuite, après le début du développement industriel des inventions, survoler seulement leurs perfectionnements successifs, mieux connus car plus proches de nous et déjà bien décrits.

– Finalement, il en résulte une Histoire de l'électricité analytique, non simplement descriptive.

Avant de relater chaque découverte ou invention, il faut rechercher ses raisons et les difficultés latentes, humer *l'air du temps* ; essayer de dégager ensuite le *fil rouge*, la démarche incertaine ou rapide qu'avaient suivie leurs auteurs, puis les conséquences qu'elle a entraînées.

Une telle analyse permet au lecteur d'intégrer à sa place chacune de ces briques éparses, dans la construction progressive, mais désordonnée et sans logique apparente, du système électrique global. La forêt est autre chose qu'une somme d'arbres.

Comprendre une invention nécessite de l'analyser bien au-delà de l'angle scientifique ou technique. Tout y intervient, la formation et l'expérience des hommes, leur mentalité, méthodologie, motivations et environnement ; ainsi que les aspects commerciaux, financiers et même nationaux, transformant parfois l'invention en un véritable thriller.

La finalité de l'histoire des sciences et techniques est d'essayer de comprendre le cheminement intellectuel qui a conduit le cerveau du découvreur ou de l'inventeur jusqu'à l'éclosion de sa recherche, une passionnante aventure de l'intelligence humaine, quels que soient l'époque et les moyens, comme le précisait le philosophe Heidegger :

« L'essence de la technique n'est rien de technique,
c'est le fonctionnement mystérieux du cerveau humain. »

Pour qui ce livre ?

Chaque lecteur peut se retrouver dans l'un de ces groupes :

– **Le monde des amateurs**, d'histoire scientifique, technique ou industrielle, ceux qui *aiment* découvrir et comprendre, par curiosité et plaisir intellectuel, un monde technique basé sur l'électricité, façonné bien ou mal par l'homme, dans lequel une grande partie de l'humanité est immergée depuis près de deux siècles. Comprendre l'étonnante aventure humaine qui leur permet de disposer à chaque fraction de seconde de cette indispensable électricité, qui avait tant étonné leur ancêtre, *l'honnête homme* des siècles précédents.

Le journaliste scientifique a une place particulière dans ce monde, car il a la difficile et essentielle tâche de la vulgarisation, mettre les sciences et techniques à la portée du public, résumer et simplifier sans déformer.

Intéresser le plus grand nombre de lecteurs est la préoccupation d'un auteur. Mais pour une histoire à caractère technique et scientifique la vulgarisation au niveau de tous n'est guère possible. L'électricité restant un mystère technique pour beaucoup, ce livre ne touchera alors qu'une partie du grand public, malgré ma préoccupation d'atténuer au mieux ce mystère que je crois avoir à peu près compris. Il ne nécessite pourtant qu'un niveau de connaissances en électricité un peu supérieur à celui du bac.

Que l'amateur ne s'étonne pas de comprendre difficilement certains sujets, les explications techniques restant le plus souvent sommaires. Ce livre n'a pas pour but de remplacer un manuel didactique ou un cours d'électricité, sinon son épaisseur serait au moins doublée. Mais il tient compte de la grande facilité qu'apporte maintenant l'internet de trouver par un clic une explication technique complémentaire sur *Wikipédia*, ou autres sites d'origine qualifiée.

– **Le monde des électriciens**, mes collègues, qui travaillent à tous niveaux dans les métiers de l'électricité, la construction et l'installation des matériels, soit pour la production et la distribution de l'électricité-énergie, soit pour le traitement et le transport de l'électricité-information.

Ils s'étonnent parfois de la somme de savoir et de savoir faire dont ils disposent aujourd'hui, accumulée depuis deux siècles par leurs prédécesseurs ; leur métier consistant à exploiter ces savoirs en y ajoutant parfois leur modeste contribution.

Leur curiosité professionnelle les incite alors à comprendre les laborieuses étapes franchies par des générations d'hommes pour arriver aujourd'hui à une connaissance presque aboutie de l'électromagnétisme, ayant guidé l'élaboration des techniques et matériels actuels, proches de la perfection. Pour le praticien, l'histoire de l'électricité n'est pas un objectif seulement intellectuel, mais un outil pour comprendre « *comment ça s'est passé* », afin d'aider à mieux gérer aujourd'hui et préparer demain, car son cerveau fonctionne comme celui de ses prédécesseurs.

Ainsi, l'électricien, contraint comme tout industriel de se projeter en permanence vers l'avenir, peut conduire judicieusement sa démarche avec l'indispensable rétroviseur de l'Histoire.

– **Le monde de la recherche**, à tous les niveaux et domaines des sciences exactes, qu'elle soit fondamentale, ou appliquée, jusqu'au développement des produits. Ce qui se passe dans le cerveau du chercheur d'aujourd'hui, les méthodes et détours pour arriver à la découverte ou l'invention, n'ont pas

fondamentalement évolué en deux siècles, comme peut-être même en dix millénaires, tel l'inventeur de la roue.

On objectera facilement qu'il y a loin de l'empilement des rondelles de zinc et de cuivre de la pile de Volta au Tokamak de fusion nucléaire - loin des lents voyages en diligence ou échanges postaux entre disciples de la *philosophie naturelle* et le téléphone numérique, les séminaires, congrès, revues et ressources de l'internet. Mais l'invariant reste le fonctionnement du cerveau de l'homme. Celui de Feynman ou de Charpak serait-il si différent de celui de Volta, Faraday ou Gramme ?

L'objectif de découvrir comment a fonctionné le cerveau de ces derniers lors de leurs découvertes ne peut être atteint que très partiellement par manque de sources ; les inventeurs qui l'ont fait, n'ont pas tout décrit de leur lent cheminement vers la lumière, au bout du tunnel. Pour les autres, il faut interpréter en fonction de ce que l'on sait de leur environnement et leurs comportements passés.

Le chercheur dans toute discipline retrouvera, dans la lente ou subite maturation des inventions et découvertes électriques, tous les comportements de l'intelligence inventive : – les détours et blocages incompréhensibles, pour nous qui savons après – les erreurs, impasses ou coups de génie inspirés par l'intuition, cette compagne séduisante, parfois trompeuse – le hasard surtout, cet ange gardien fugitif qu'il faut savoir saisir et interpréter avec la *serendipité*, (ancienne expression redécouverte, associant la sagacité, la curiosité et l'agilité mentale permettant de rester à l'affût d'un hasard surprenant) – Maxwell, le physicien le plus original du XIX^e, ajoutait l'imagination, capacité d'élaborer des métaphores fécondes.

Les découvreurs ont eu souvent leurs failles, leurs erreurs, ce qui les rend plus humain, seul un dieu peut détenir la Vérité. Aussi il ne faut pas masquer systématiquement les succès, ni les erreurs ; au contraire, quoi de plus décourageant pour le jeune chercheur que de croire ses aînés infaillibles et que lui seul se trompe ? Dans les sciences exactes, plus que dans d'autres domaines, le droit à l'erreur est reconnu, et non humiliant. À condition bien sûr, de ne pas s'y entêter lorsque des faits la révèlent.

Ainsi, personne ne contesterait l'invention capitale de la pile, base fondamentale de toute l'électricité ; pourtant Volta l'a inventée en cumulant deux erreurs, l'une compensant pratiquement l'autre, et sa pile marchait !

L'histoire nous révèle que beaucoup d'inventeurs n'ont pas compris pourquoi leur machine fonctionnait. En électricité, l'invention a le plus souvent, au début, précédé la théorie explicative. Les inventions chinoises ne résultaient pas d'une démarche scientifique préalable, mais d'observations empiriques. Et puis, les chercheurs savent bien qu'une expérience ratée en apprend souvent plus que celle qui réussit. Elle oblige à rechercher l'erreur expérimentale, ou la faille dans l'interprétation de la théorie, ou peut être dans la théorie elle-même qu'il faut alors remettre en question, déclenchant ainsi de fructueuses controverses. Les échanges de point de vue, les expériences nouvelles qu'elles suscitent sont générateurs de progrès ; parfois retardés par l'ignorance, la mauvaise foi humaine ou des dérives lorsque certains assimilent une théorie scientifique à un dogme, confondant alors science et religion. La Vérité scientifique n'est que transitoire, Newton précisait bien dans ses énoncés : *Tout se passe comme si...*

Aux siècles précédents, les controverses techniques dans les revues étaient plus fréquentes qu'actuellement où l'on privilégie trop un consensus, proche de l'idéologie. Il aura fallu 20 ans de controverses entre *galvanistes* et *voltaïstes* pour découvrir, par hasard, l'électricité de la pile de Volta, 10 ans d'une *guerre des courants*, internationale, pour reconnaître l'intérêt du courant alternatif sur le continu.

– **Le monde de la formation**, du collège à l'université et l'école d'ingénieurs, du professeur à l'élève. À la différence des arts, lettres, sciences humaines ou philosophie, les sciences dites exactes et ses techniques sont étrangement enseignées sans référence à leur mûrissement progressif, leur histoire, comme si elles étaient apparues dans leur état actuel par génération spontanée. L'histoire des sciences et techniques, trop négligée en France, presque absente de l'Université et des Écoles, n'aurait pas à faire

l'objet d'une discipline à part entière, mais être intégrée à l'enseignement théorique et pratique dans tout domaine.

L'enseignant en physique, qui n'a pas acquis ce complément de formation, trouvera donc dans ce livre l'essentiel de l'histoire de l'électricité. Plutôt que de présenter à l'élève des connaissances figées au seul état actuel, il pourra dérouler en accéléré sur nombre de sujets trop abstraits, les étapes de la maturation de ces connaissances jusqu'à aujourd'hui, renforçant l'intérêt et la compréhension de son cours.

Quant à l'élève ou l'étudiant, l'histoire est une autre façon d'apprendre et surtout d'assimiler les connaissances : au lieu d'enregistrer un fait ou un concept abstrait par simple mémorisation, le découvrir en questionnant son histoire avec le pourquoi et le comment va lui donner une vie, considérer l'état présent comme le résultat d'une évolution dans le temps, se prolongeant dans le futur qu'il va construire dans son métier, car nous savons bien que rien en science et technique n'est définitivement figé.

– *Le monde des historiens en science.*

Cette histoire qui ne leur est pas particulièrement destinée, étant assez bien connue de nombre d'entre eux, s'est donné quelques libertés de forme par rapport aux règles des documents historiques traditionnels ; ceci pour mieux répondre à ses propres objectifs de vulgarisation et éviter une lecture trop austère.

Il était ainsi impossible de référencer les sources précises des dizaines de milliers de faits et événements relatés. Les sources générales signalées en bibliographie sont complétées à la fin de chaque chapitre par la référence des documents à consulter, les moins connus. Sur le fond, la remontée systématique aux sources les plus anciennes, accessibles et estimées fiables, s'est traduite par de nombreuses différences d'interprétations et même de faits, par rapport à des travaux se contentant souvent de recopier les précédents avec leurs erreurs, sans trop vérifier ni se poser de question, mais en se réfugiant derrière une abondante bibliographie.

Il a été long et difficile de repartir volontairement presque à zéro, de presque tout vérifier à plusieurs sources, comme si rien n'avait été écrit sur le sujet, en particulier sur des sujets classiques. Le rôle des hommes s'en est parfois trouvé soit amplifié, soit plus réduit, ou différent.

La recherche-développement que j'ai pratiquée un temps m'avait appris l'incertitude, le doute, avec la méfiance de l'affirmation, « *si tout le monde le dit, ou l'écrit, cela doit être vrai.* » L'internet serait trop souvent la preuve du contraire. Transposer ce réflexe à la recherche historique a révélé quelques surprises ; l'historien de l'électricité découvrira ainsi plusieurs développements inédits et nombre d'interprétations non traditionnelles.

Comment ce livre ?

Toute histoire se raconte normalement en suivant la chronologie des événements. Pour l'électricité, le foisonnement des découvertes et inventions se déroulant simultanément nécessite un plan alternant une succession de mise *en parallèle* puis *mise en série* chronologique, à l'image des circuits familiers à l'électricien. S'est alors imposé, pour plus de clarté, un découpage en chapitres thématiques, mais facilitant le *zapping* du lecteur suivant ses centres d'intérêt.

Dès le début, le lecteur constatera que la dichotomie technologique entre l'électrotechnique et l'électronique apparue au début du XX^e siècle gagne à être remplacée aujourd'hui par un classement en domaines fonctionnels, *l'électricité vecteur d'énergie et l'électricité vecteur d'information.*

On m'avait appris l'électronique comme la circulation des électrons dans le vide, ne véhiculant donc que des courants faibles, contrastant avec l'électrotechnique où les courants forts circulent dans les métaux et voilà qu'apparaît dans les années 1960 la circulation des électrons dans l'*état solide*, les semi-conducteurs, avec possibilité de forts courants et l'apparition d'une électronique de puissance à

côté de l'électrotechnique pour les mêmes applications. Et puis où classer les ondes électromagnétiques, de l'électricité sans électrons mais via les photons ? De même l'apparition du signal digital ou numérique, langage des premiers calculateurs devenus ordinateurs, a été appliquée aux ondes et permis le téléphone portable, la TNT et autres.

Le classement adopté permet de regrouper logiquement dans le même groupe fonctionnel de l'électricité-information : télégraphe, téléphone (à fils), puis TSF, radio, télévision, automatismes industriels, radar, GPS, informatique, téléphone portable (par ondes). Le vocabulaire ne peut évoluer en permanence avec les techniques, il doit se baser sur la fonction remplie par la machine, quel que soit son évolution technologique que le profane discerne mal.

Certains regretteront de ne pas retrouver dans ce livre la classique chronologie synthétique des inventions avec le nom de l'inventeur. Après l'avoir lu, ils constateront eux-mêmes la gageure de trouver quand et qui a inventé le télégraphe, la lampe, le moteur, ou le transformateur. Par contre, pour les découvertes, peu nombreuses, leur date et leur auteur, sont bien identifiés.

L'iconographie a été en majorité empruntée à nombre de vieux bouquins et anciennes revues pour replacer le lecteur dans l'air du temps, et par surcroît pour l'esthétique de la gravure au trait, contrastant avec la réalité crue de la photographie en couleur des rares machines conservées dans les musées ou collections.

Le lecteur trouvera avantage au rassemblement en fin de chapitre comme dans les anciens livres, plutôt qu'en bas de page, de *compléments* regroupant, un peu en vrac, trois types d'informations : la bibliographie peu ou pas connue sur le thème, des compléments d'ordre technique et annexes et parfois des réflexions personnelles, subjectives, sur des aspects incidents à l'histoire..

Quelques précisions

Le XIX^e, siècle de l'électricité ?

Tel le dénommaient ceux qui l'ont vécu, après celui de la vapeur.

Ce livre est un projecteur focalisé surtout sur ce siècle, avec certes un *avant*, la découverte de l'électrostatique, mais s'arrête généralement à l'expansion des techniques électriques au XX^e siècle. C'est la conséquence d'un choix, se limiter généralement à la genèse des découvertes et inventions jusqu'au début de leur développement industriel. Leurs perfectionnements jusqu'à notre époque sont un sujet déjà largement traité dans nombre de livres.

Après 1900, dans le domaine de l'électricité, *vecteur d'énergie*, l'essentiel des bases théoriques était établi, la plupart des matériels étaient inventés, beaucoup en développement. Le XX^e siècle suivant n'a apporté qu'un nombre réduit de véritables inventions, qu'il ne faut pas confondre avec de multiples perfectionnements et d'impressionnants développements quantitatifs. Ce fut la montée en puissance dans tous les pays d'une grande industrie de construction électrique en amont de celles de production et distribution d'énergie, histoire plus proche et mieux connue.

Par contre, dans l'autre grand domaine de l'électricité, *vecteur d'information*, le XIX^e avait déjà brillé avec les inventions du télégraphe, du téléphone, l'enfance de la T.S.F. et son évolution vers la radio avec le tube électronique. La première moitié du XX^e apporta dans ce domaine des inventions importantes, telle la télévision, accompagnées des perfectionnements des précédentes.

Mais en 1948 surgit discrètement la découverte fondamentale du transistor à semi-conducteur, aussi importante pour l'humanité par ses conséquences que celle des ondes en 1888 ou de la pile en 1800. Le livre s'arrête après. En effet l'invention déclenchait progressivement la nouvelle vague déferlante d'innovations que nous savons avec l'automatique et l'informatique, elles nécessiteront un autre livre à part entière lorsque cette vague se stabilisera. L'Histoire a besoin d'un certain recul.

Le développeur de l'invention

Faute d'autre appellation, le *développeur* est le personnage indispensable dans toute invention, celui qui va traduire l'idée, le projet, la maquette ou le brevet en produit au point, fabriqué industriellement et commercialisé à un coût acceptable, pour être utilisable par tous - en résumé, celui qui assure le développement. Le développeur est souvent l'inventeur, s'il sait s'entourer d'autres compétences en matière d'investissement financier, de fabrication et de commercialisation, au cas fréquent où il n'aurait pas lui-même ces aptitudes. Les inventeurs s'arrêtant seulement à l'idée sont nombreux aux offices de brevet comme au concours Lépine. Les développeurs sont plus rares. Sans ce long et difficile parcours, l'invention a-t-elle un intérêt autre qu'intellectuel pour l'inventeur? mais très restreint pour l'humanité.

Un personnage célèbre, Edison, écrivait : « Il est facile d'inventer des choses étonnantes, mais la difficulté consiste à les perfectionner pour leur donner une valeur commerciale. Ce sont celles-là dont je m'occupe. »

Même dans notre civilisation qualifiée péjorativement de matérialiste, l'homme qui a eu l'idée est souvent plus considéré que celui qui l'a réalisé. Est-ce juste ?

Le vedettariat, le premier qui...

L'histoire des sciences et techniques n'échappe pas à la passion, cultivée dans tous domaines par les médias, d'identifier le nom de l'inventeur unique, le premier qui..., le grand homme exceptionnel. Si la découverte est réalisée par une équipe de deux ou trois personnes, cela n'intéresse déjà plus beaucoup. Qui connaît le nom des trois inventeurs du transistor, base fondamentale de l'informatique ? De même pour le laser, cœur du disque optique, CD puis DVD ? Ce culte de la personnalité a été amplifié par les susceptibilités nationales, particulièrement exacerbées avec les conflits politiques du XIX^e siècle.

Dans ce livre, j'ai cherché à éviter cette loupe déformante ; aussi, les antériorités et recherches parallèles sont souvent évoquées, non pour diminuer le mérite de l'inventeur supposé unique, mais pour plusieurs raisons :

- La réalité historique qu'il faut cerner au mieux, c'est-à-dire rechercher la participation et l'apport de chacun des intervenants, souvent nombreux dans toute invention.

- Préciser « l'avant », les travaux antérieurs importants pour comprendre le contexte.

- Une découverte ou invention ne peut être faite et « reçue » que si l'état d'esprit de l'époque y est préparé, s'il y a une attente diffuse, pour des raisons autant sociologiques que l'état des connaissances, l'air du temps, ou tout simplement si l'information circule bien, pas toujours le cas aux siècles passés. L'histoire est riche des découvertes oubliées, ou non publiées, ou encore manquées d'un cheveu.

- Nombre d'inventions ont donc été des réinventions. Le deuxième inventeur a autant de mérite que le premier, si celui-ci lui était inconnu, sinon c'est de la tricherie. Il en a souvent beaucoup plus s'il a eu la persévérance et les qualités pratiques d'un « développeur », capable de transformer l'idée ou le brevet inexploité en produit au point, commercialisable, donc utile à la société.

- L'attribution d'une invention à un seul homme résulte d'une schématisation souvent un peu abusive. On constatera au fil des pages que la plupart des découvertes ou inventions résultent non de l'apport d'un seul homme, mais de la superposition ou croisement de plusieurs apports individuels. Tout inventeur bénéficie inconsciemment des progrès de la connaissance et du travail des précurseurs qui ont préparé le terrain ; même s'ils n'ont pas tracé la voie à suivre, ils ont déjà détecté les pistes sans issue où certains vont se perdre.

On compare parfois la science, la connaissance de la Nature, à un escalier sans fin dont chaque découvreur fait franchir à l'humanité une marche plus ou moins haute. C'est une œuvre collective, l'individu n'étant qu'un maillon de la chaîne de l'humanité. Conception certes plus intégrée dans les cultures asiatiques, pour qui l'homme est d'abord un élément du groupe, familial, ethnique, ou national que dans celle des occidentaux, lui attribuant une place unique dans l'univers, avec des droits individuels, parfois supérieurs à l'intérêt collectif.

Aussi je n'ai pas voulu, sauf évidence des faits, prendre parti dans ces querelles de priorité, mais simplement les analyser pour comprendre comment l'invention a mûri différemment dans plusieurs cerveaux, souvent éloignés dans le temps, le lieu et les objectifs, laissant ainsi au lecteur la possibilité d'apprécier lui-même, s'il le souhaitait, lequel serait le principal inventeur. Ces litiges font aussi partie de l'histoire technique, bien qu'étant souvent liés à des intérêts commerciaux, financiers ou nationaux.

En bref, la question première à laquelle doit répondre l'étude de la genèse d'une découverte ou invention est :

Pourquoi ? ou comment ? avant la recherche de qui ?

Le brevet, preuve de l'invention ?

La question du brevet a beaucoup perturbé l'émergence des inventions électriques au cours du XIX^e. Les inventeurs européens ne comprirent que progressivement, à leurs dépens, la nécessité et les modalités de la prise d'un brevet protégeant l'exclusivité de leur invention dans les pays où ils pensaient l'exploiter. Chaque pays avait ses propres règles et le coût de dépôt éliminait souvent les inventeurs peu argentés. La validité d'un brevet était de 15 à 20 ans. En France, jusqu'aux années 1970, le brevet était SGD, Sans Garantie Du Gouvernement. Les contestations se traitant uniquement auprès des tribunaux. En Amérique, la mentalité et la pratique étaient différentes, comme l'illustre l'histoire des inventions du téléphone ou de la lampe à incandescence.

Ainsi l'inventeur reconnu est toujours « le premier qui... », a déposé un brevet valable du dispositif, mais pas toujours celui qui l'avait fait fonctionner avant.

Le brevet reste cependant un mal nécessaire, qui a permis à beaucoup d'inventeurs sans ressources de poursuivre leurs travaux. Parfois des universitaires bénéficiant de rémunération suffisante, de laboratoires et d'assistants, payés par l'État, ont refusé de prendre des brevets, considérant qu'ils travaillaient pour l'État ou l'humanité, pas pour s'enrichir (Davy, Ferraris). Dans l'industrie, le brevet appartient généralement à l'entreprise qui emploie le chercheur.

D'une façon générale, rappelons que :

- Le dispositif breveté doit être réellement nouveau, fonctionner, et réalisable industriellement.
- Une découverte, un principe, une idée ne sont pas brevetables. Une simple reconnaissance morale peut être accordée au découvreur par un honneur, une médaille telle la médaille Copley, toujours attribuée chaque année par la Royal Society, ou un prix. Exemple le plus connu, le prix Nobel (après 1901).

La protection de la propriété intellectuelle de l'homme est ainsi différente suivant sa nature : uniquement morale pour une découverte scientifique (domaine public), quinze à vingt ans par le brevet si elle est technique et industrielle, très longtemps, près d'un siècle, s'étendant même 70 ans après la mort, si elle est littéraire ou artistique.

Pourquoi une telle différence entre différents produits de la même intelligence ? Le chanteur gagne beaucoup plus d'argent que l'inventeur du micro ou du CD, sans lesquels il serait inaudible.

Une histoire internationale

Dans un domaine aussi universel que l'électricité, une histoire simplement nationale ou régionale n'est guère envisageable. L'électricité, comme toute science ou technique, s'est développée par l'apport d'hommes appartenant à une dizaine de nations ; l'historien a une tendance, souvent involontaire, d'amplifier le rôle des hommes de son pays, où leur mémoire est cultivée et les archives dans sa langue sont plus nombreuses.

Certains se risquent parfois à hiérarchiser l'importance des « grands » découvreurs : Pour l'Américain ce serait Franklin ou Henry, pour l'Italien Volta ou Ferraris, pour le Français Ampère, pour l'Anglais Faraday ou, pour l'Allemand Gauss ou Hertz, pour l'Écossais Maxwell. L'ego trop affirmé de quelques hommes ou nations n'est pourtant guère compatible avec l'esprit scientifique, pour lequel la compétition, et plus encore la controverse, sont néanmoins des stimulants riches et salutaires, mais entre gens de bonne foi.

Conscient de ces risques, j'ai donc oublié d'être né français et me considère si possible comme un citoyen du monde ; avec l'excuse de m'être beaucoup plus appuyé sur des sources d'origine française, qui m'étaient plus accessibles.

J'aurais souhaité que ces livres soient écrits par un collectif de plusieurs électriciens ayant le goût de l'histoire et d'historiens des techniques, appartenant à des nationalités différentes. Entreprise compliquée, qui aurait demandé quelques années de plus. Ce sera la tâche de la génération suivante d'écrire une vingt septième Histoire de l'électricité, vraiment mondiale. Elles intégreront les innovations en cours dans le traitement de l'information, qui n'ont pas été analysées, encore trop proches pour entrer dans l'Histoire.

Que mes centaines d'heures de recherches pour ce livre, en 20 ans, apportent aux lecteurs un nouveau regard sur la construction de notre monde électrique, assoiffé d'énergie et envahi par la surinformation.

Ils feront mieux comprendre, autour d'eux, la culture scientifique et technique, trop méjugée en France, l'une des causes de sa régression industrielle.

Exemple : Que fait-on quand un enfant ne réussit pas dans le système scolaire français ? Il est envoyé sur la voie de garage du manuel, technique ou apprentissage.

André Ducluzaux
2011



La Fée Électricité
Raoul Dufy - détail

Musée d'art moderne, Paris, 1937.



La Fée électricité éclaire le monde - 1881

1 - L'électricité

Essai de définition

En dépit de son omniprésence dans la vie quotidienne comme l'air et l'eau, l'électricité conserve une réputation de fée mystérieuse, dont les médias la gratifient, faute de pouvoir l'expliquer. Il est vrai, l'électricité n'est pas facile à définir.

Larousse nous en donne une définition très restrictive : « Manifestation d'une forme d'énergie associée à des charges électriques au repos ou en mouvement. » C'est plus qu'une forme d'énergie, mais aussi un vecteur d'information.

Une définition générale et trop concise serait pour le physicien :

“ Les phénomènes associés à la présence et au déplacement de charges électriques ”

Exacte, mais elle pose plus de questions qu'elle n'en résout. Les phénomènes évoqués sont très nombreux et il faut d'abord définir la charge électrique. Nous savons que la charge élémentaire négative est celle de l'électron, particule présente dans tous les atomes où elle équilibre la charge positive du proton, le noyau d'hydrogène, l'un des constituants de tous les autres noyaux. L'électron, relativement libre, peut quitter son atome et se déplacer assez facilement dans certains milieux ; pas le proton, 1835 fois plus lourd, et très lié à ses voisins. L'absence d'un électron dans un semi-conducteur crée elle-même un trou, jouant un peu le rôle d'une charge positive. On a aussi découvert un très fugitif anti-électron, le positon, de charge positive, la première particule d'antimatière.

Quant à limiter la définition de l'électricité à des particules, ce serait un peu comme réduire l'iceberg à sa seule partie émergée. N'oublions pas qu'en provoquant l'agitation des électrons à très haute fréquence, ils génèrent un champ électromagnétique, se traduisant par la propagation d'ondes de la même famille que la lumière. Cet autre phénomène électrique fondamental se propage avec une autre particule, le photon, immatériel, sans masse ni charge, ni une onde, ni vraiment une particule, mais les deux à la fois nous expliquent les physiciens.

Le comportement de l'électron est différent au repos, régi par l'électrostatique, ou en mouvement par l'électrocinétique. Son effet direct en mouvement est d'abord la production d'énergie calorifique dans les conducteurs, sauf s'ils deviennent supraconducteurs à très basse température. De plus l'électron ne véhicule pas lui-même l'énergie, comme on pourrait le supposer, sa vitesse moyenne dans les conducteurs étant très faible, mais il crée par son déplacement un champ électromagnétique dans son environnement, lequel transmet à grande vitesse énergie et information. Suivant que le mouvement moyen de l'électron est continu ou variable, oscillant, les effets de ce champ sont aussi différents. C'est le vaste domaine de l'électromagnétisme, régi par l'une des quatre forces fondamentales de l'univers, et que l'on croyait bien comprendre au début du XX^e siècle.

Mais les physiciens ont soulevé encore un coin du voile vers un monde étrange, qu'Einstein lui-même ne comprenait pas, le comportement quantique des particules élémentaires, dont l'électron, très différent de la mécanique classique de notre environnement familier.

Les découvreurs et inventeurs du XIX^e siècle se contentaient de considérer l'électricité, qu'ils maîtrisaient progressivement sans la comprendre, comme d'autres fluides mystérieux, la chaleur, le magnétisme, la lumière, la gravité. Pour réaliser la première grande centrale hydroélectrique du monde sur le Niagara en 1895, ils n'avaient pas besoin de connaître l'électron, ni la nature du champ

magnétique, seulement leurs effets. L'homme curieux d'aujourd'hui, dont le cerveau n'est pas programmé avec un logiciel spécifique pour comprendre le quantique, n'a pas vraiment besoin de savoir quelle est la nature profonde de l'électricité. Il utilise bien la gravitation, dans sa vie quotidienne ou pour lancer des satellites, révélée par Newton, approfondie par Einstein, mais ne connaît toujours pas sa nature, peut-être le graviton ? Il lui suffit de connaître et comprendre ses effets et propriétés, à l'origine des applications qu'il utilise.

De même que nous ne connaissons qu'imparfaitement les fondements de la gravitation, comme ceux de la vie et de bien d'autres phénomènes, alors cherchons plutôt la compréhension de l'électricité par ses multiples utilisations.

Domaines d'applications

Mieux qu'une définition de l'électricité, inévitablement imparfaite ou complexe, le classement par domaines d'applications ou fonctions adopté dans ce livre devrait clarifier son approche. Il met en relief les deux plus fondamentaux, l'énergie et l'information, symétriques comme les deux visages du dieu romain Janus :

L'électricité, vecteur d'énergie

Malgré la difficulté des physiciens à définir cet autre concept fondamental qu'est l'énergie, nous pouvons classer l'électricité d'abord comme une forme d'énergie particulière. Elle n'existe pratiquement pas à l'état naturel, il faut la générer par conversion d'une autre énergie, et elle n'est utilisable qu'après reconversion en une autre forme, lumière, chaleur ou énergie mécanique. Cette énergie intermédiaire n'est ainsi *qu'un vecteur d'énergie véhiculée entre deux convertisseurs*. Les applications de l'électricité-énergie exploitent certaines de ses propriétés : transmettre de très fortes puissances dans des conducteurs de très faibles dimensions, et ceci quasi instantanément et très loin, à plus de mille km, sans perte rédhibitoire. Malheureusement l'énergie ne se transporte pratiquement pas sans fil, par ondes électromagnétiques, comme l'information. Peut-être une vérité seulement transitoire ?

L'électricité, vecteur d'information

Contrairement à la précédente, ses applications ne véhiculent qu'une très faible énergie. Une information physique quelconque, parole, lumière, action ou musique, est convertie en signal électrique par un émetteur, codée par différents moyens. Puis elle est transmise par fil ou par ondes à un récepteur éloigné, qui reconvertit ce signal en une forme accessible à nos sens. L'électricité est donc aussi *un vecteur d'information, véhiculée entre deux convertisseurs*. Ces applications exploitent d'autres propriétés de l'électricité : les multiples formes possibles d'un signal électrique en nature, durée, amplitude, fréquence, numérisation. Sa transmission est quasi instantanée, au moins sur notre planète. Le signal voyage à la vitesse de la lumière, soit dans les conducteurs, soit dans le vide ou les gaz par le rayonnement électromagnétique, jusqu'à l'infini de l'univers.

À ces deux principaux domaines d'applications s'ajoutent deux autres, le rôle de l'électricité dans la matière inerte et celui bien différent dans la matière vivante. Ils sont certes aussi importants, mais s'appliquent dans des domaines plus spécifiques :

L'électrochimie

L'électron négatif et le proton positif étant deux composants de l'atome, l'électricité est, de par la force d'attraction mutuelle qui en résulte, un facteur essentiel de cohésion de toute matière élémentaire.

En agissant de l'extérieur, elle peut alors fragmenter ou à l'inverse construire des molécules, assemblage d'atomes, c'est-à-dire faire de la chimie, en copiant simplement la Nature.

L'électrobiologie

Ce processus vital de contrôle-commande joue un rôle encore assez mal connu, pour la transmission de l'information par le système nerveux après son traitement et stockage dans le cerveau. Lequel va ensuite commander les muscles, moteurs fonctionnant avec l'énergie chimique des aliments et l'oxygène. Ainsi, avec ce super logiciel de l'intelligence, le cerveau fonctionne à l'électricité comme l'ordinateur, son clone très, très élémentaire, pratiquement incapable d'intelligence, par contre doué d'une mémoire infiniment plus grande.

Une réponse à : **Qu'est-ce que c'est l'électricité ?** serait alors un double biface :

- Un vecteur d'énergie.
- Un vecteur d'information.
 - Le ciment de la matière inerte
 - Le contrôle-commande dans la matière vivante

L'objet de ce livre se limite à l'émergence des trois premières catégories d'applications. Le processus vital, la biologie, c'est une autre histoire, peu accessible au physicien. Souhaitons que l'association d'un neurologue et d'un électricien nous fasse découvrir cette histoire complexe et le rôle de l'électricité dans la vie animale et végétale, depuis sa découverte il y a deux siècles, grâce à la grenouille de Galvani.

L'électricité dangereuse ?

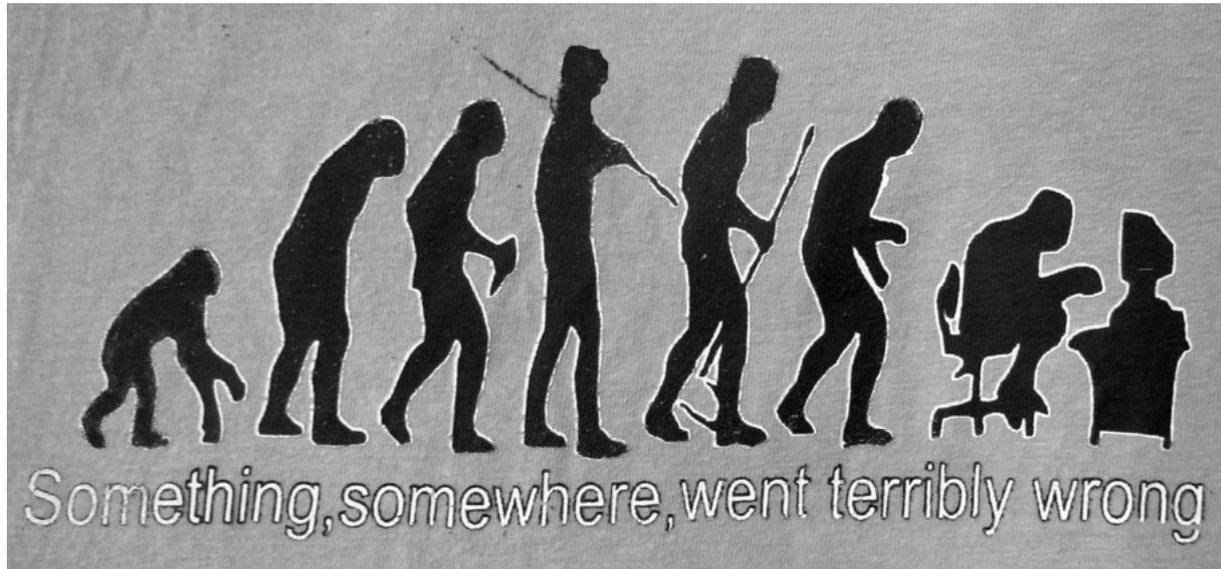
Dans le monde dit développé, la mort et son corollaire la vie ont pris en un demi-siècle une forte charge symbolique. En parallèle, les créations de l'intelligence humaine, les découvertes scientifiques et inventions, de l'automobile au nucléaire, y contribuent. Leur généralisation se présente comme le meilleur et le pire, semblable à l'expression des contraires yin et yang des orientaux. L'homo dit sapiens, se révèle alors bien peu capable de bien gérer tous ces nouveaux pouvoirs que la Science lui donne progressivement sur la Nature, développer le meilleur en limitant le pire... si possible.

Ainsi, la production et l'utilisation de l'électricité-énergie dans le monde tue directement quelques 30 000 hommes par an, seulement 250 en France, et autant par les incendies d'origine électrique. C'est très peu en moyenne, puisque personne ne proteste pour l'interdire, sauf si un grand nombre périt simultanément dans une rare catastrophe.

L'électricité-information ne véhiculant qu'une infime énergie pourrait alors être considérée comme inoffensive. Pourtant dans le large éventail des ondes électromagnétiques du 50 Hz aux rayons cosmiques, seules les fréquences au-dessus de celle de la lumière visible étaient considérées comme dangereuses, ayant une puissance d'ionisation croissante. Mais voilà que les fréquences en dessous, qui ne produisent que des effets thermiques si elles sont concentrées, celles du radar, du four à micro-ondes, de la radio, de la télévision et de la téléphonie mobile sont soupçonnées l'être aussi. La lumière serait alors encore plus dangereuse.

Le bon sens commun comprend mal que la science n'arrive pas à prouver, ou que ces radiations qui fourmillent dans notre éther sont dangereuses, ou qu'elles ne le sont pas. Pain bénit pour les psychopathes et charlatans.

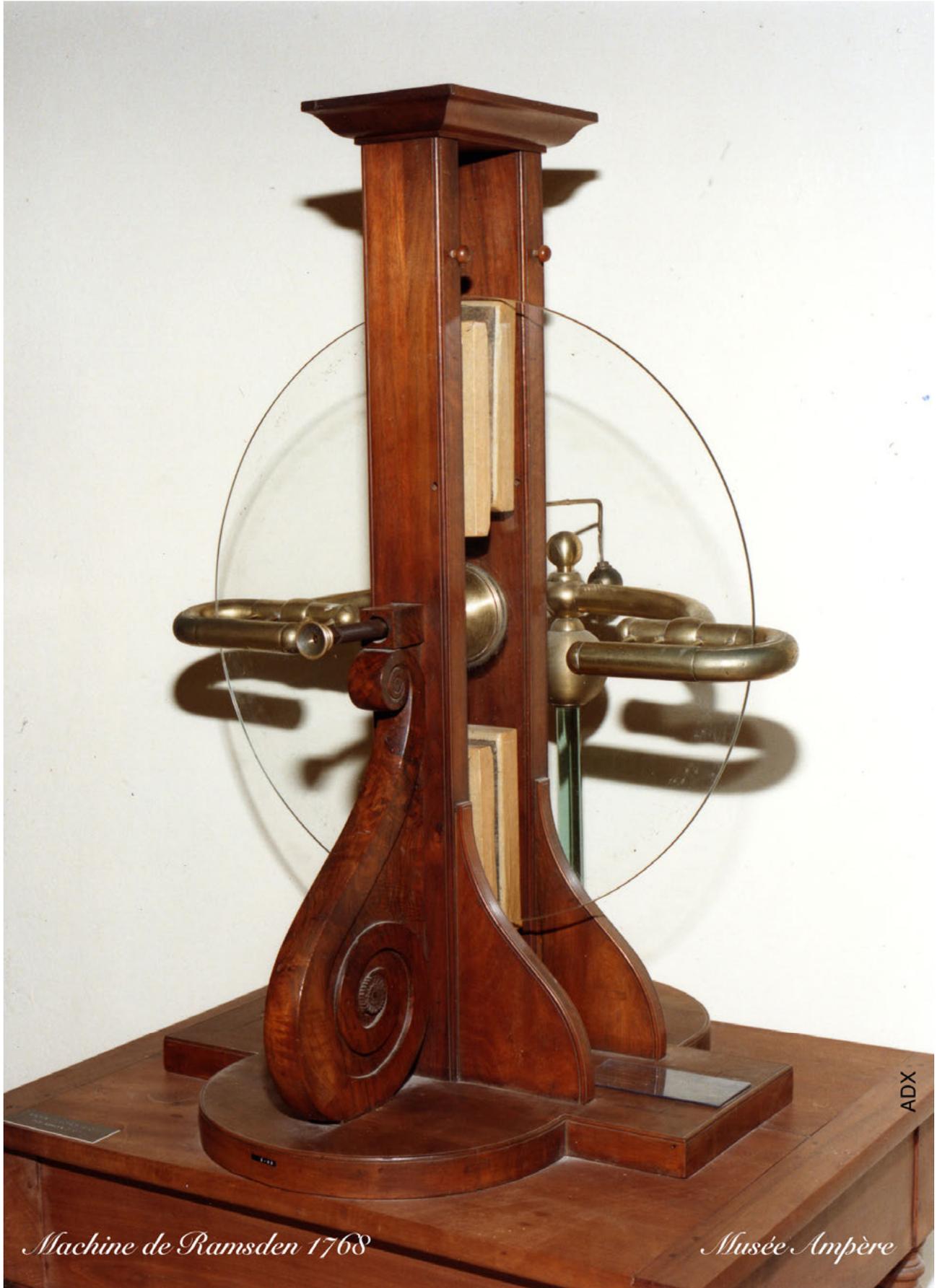
Ces radiations entraîneraient aussi la dégénérescence darwinienne vers l'homo informaticus ?



The human evolution

Traité Pratique D'ÉLECTRICITÉ





Machine de Ramsden 1768

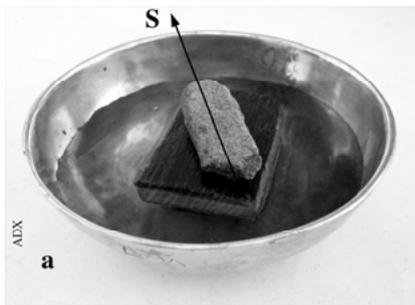
Musée Ampère

ADX

2 – Magnétisme et électricité statique

Des anciens chinois à Coulomb

Préhistoire



Lorsque la conscience vint à *homo sapiens*, il réalisa que tout son environnement, la terre, l'eau, le ciel, le feu, la vie étaient sujet à une multitude de phénomènes inexplicables, sinon par l'intervention de divinités ou de forces surnaturelles.

Pourquoi se serait-il alors posé des questions sur un phénomène aussi insignifiant, à peine perceptible, le magnétisme, cette subtile attraction à faible distance d'une pierre grise, la magnétite, un oxyde de fer, Fe_3O_4 , sur les débris d'autres cailloux rougeâtres, du fer météoritique tombé du ciel pendant des millions d'années avant son existence ?

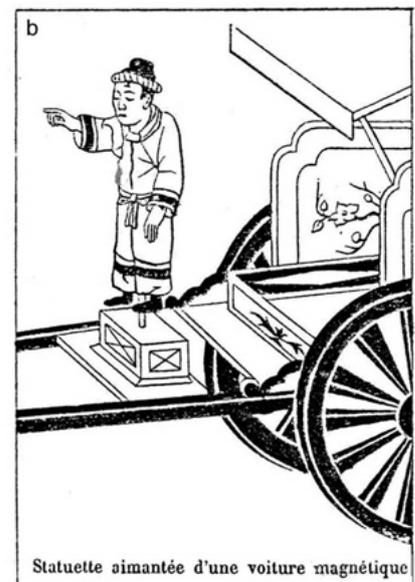
Et pourtant des chinois, étonnants précurseurs des techniques, remarquèrent il y a plus de 4000 ans qu'en posant l'une de ces pierres sur un morceau de bois flottant sur l'eau, elle se dirigeait toujours dans le même sens par rapport à la terre (a). Ce n'était pas encore la boussole des marins, mais d'après un ancien texte, le *Thung kian kang mou*, de -2634, l'empereur Hoang Ti possédait un “**char magnétique**”, équipée d'un pavillon soutenu par quatre dragons, sur lequel se dressait un petit génie le bras tendu. Il pivotait sur un axe vertical et son bras contenant un petit barreau de magnétite, indiquait le Sud (b).

Cette voiture, ancêtre de celles à GPS, permettait à l'empereur de poursuivre ses ennemis dans la poussière ou le brouillard, à travers les steppes de Mongolie et Tartarie, souvent couvertes de nuages cachant soleil ou étoiles, seuls repères pour retrouver sa route (1).

L'invention se perdit, fut retrouvée en -1100, puis signalée à nouveau en 235. Elle fut perfectionnée en remplaçant le barreau de magnétite par une tige d'acier aimantée par frottement ou un procédé thermique.

Le barreau prit la forme approximative d'une cuiller posée sur un plateau de bronze. Elle simulait la grande Ourse dont l'extrémité de l'anse était l'étoile Polaire, symbole de l'Empereur.

Puis elle a migré par l'une des routes de la soie, passant par l'Inde jusqu'au Moyen Orient, chez les Arabes. On la signale en Occident vers le XII^e siècle, ramenée par les navigateurs vénitiens.



En 1302, di Gioia, marin d'Amalfi, fixa la tige aimantée sur un axe vertical et la protégea dans une petite boîte, **la bussola** (c).

L'histoire des sciences et techniques nous apprend comment l'ancienne civilisation chinoise a inventé, des siècles avant l'Occident, bien d'autres techniques : la poudre pour les canons et les feux d'artifice, le papier, l'imprimerie, la porcelaine, la soie, le cerf-volant, le système décimal, la métallurgie du fer, le gaz d'éclairage.

Mais les chinois, observateurs réfléchis, ne s'intéressaient qu'aux applications techniques utiles, sans chercher à comprendre le pourquoi, objectif de la science.

À l'inverse, les Grecs, probablement les premiers scientifiques, étaient préoccupés de comprendre le fonctionnement du monde, sans chercher à en déduire des applications. C'est dans la ville de Milet à l'ouest de l'Anatolie, grecque pendant trois millénaires, avant d'être occupé par les Ottomans, devenus les Turcs, que fut fondée l'école ionique par Thalès en – 600, l'une des deux grandes sources de la pensée philosophique grecque (2). Rappelons que la philosophie recouvrait jusqu'au XIX^e siècle tous les champs d'investigation de la pensée vers la connaissance, notamment *la philosophie naturelle*, l'étude de la Nature et de l'Univers, que nous subdivisons maintenant en branches scientifiques : physique, astronomie, chimie, biologie, etc.

Thalès (d) le plus ancien et illustre des sept sages peut être considéré comme le premier scientifique. Il étudia les effets d'attraction de cette pierre dite *Pierre d'Héraclée*. Le terme *magnétique* viendrait de la ville de **Magnésie** ou d'un berger Magnès qui en trouvait des morceaux collés à la pointe de fer de son bâton ; le nom d'*aimant* fut plus tard dérivé de l'arabe.

Il remarqua un autre phénomène d'attraction : lorsque l'on frotte un morceau d'ambre jaune, en grec *elektron*, avec une peau de chat ou un tissu sec, il attire les poussières et brins de paille alentour (e).

L'ambre jaune était une résine fossile, abondante sur les rives de la Baltique, que les commerçants transportaient du Nord au Sud de l'Europe, jusqu'à la Méditerranée. Elle servait de monnaie dans les pays du Nord et était appréciée ailleurs comme bijou et quelques vertus curatives ou magiques.



c

ADX



d

Thalès de Milet



Telle serait la découverte de ces deux phénomènes, souvent associés mais non confondus, **le magnétisme et l'électricité statique** ; ils possédaient tous deux l'étrange propriété d'attraction à petite distance, que Newton découvrit aussi entre les corps célestes deux millénaires plus tard, mais cette force de gravité est beaucoup plus faible.

Les Romains, esprits pratiques, constructeurs, organisateurs et militaires efficaces ne se sont pas intéressés aux sciences, à l'instar des chinois.

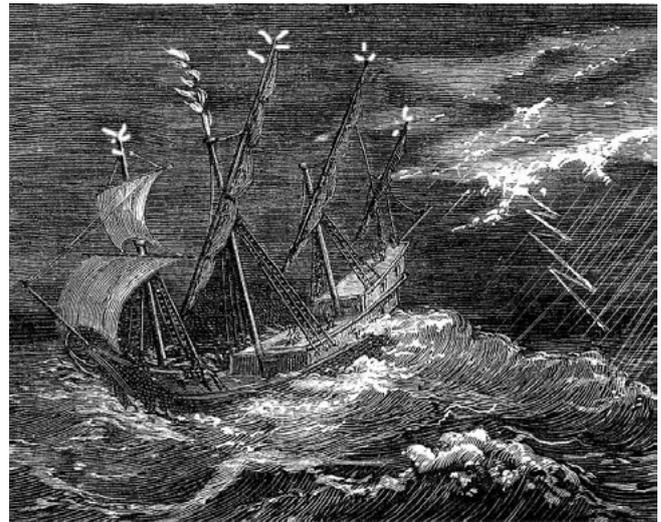
Pline l'Ancien se limita à consigner l'ensemble des connaissances de l'époque sur la Nature, c'est tout.

Il rapporte sa vision de feux étranges qui s'allumaient un soir d'orage à la pointe des piques des soldats de garde sur les remparts. César, lui aussi note que les lances des légionnaires ont paru s'enflammer avant l'orage, peut être un présage de victoire. Les marins étaient habitués à voir ces lueurs au bout de leurs mats et l'ont baptisé le feu de St Elme, ce saint qui aurait péri enroulé autour d'un cabestan de marine (f).

En ce qui concerne l'ambre, le *succin*, **Pline** note « quand le frottement lui a donné la chaleur et la vie, il attire les brins de pailles comme l'aimant. »

Modeste progrès en sept siècles !

Le feu de St Elme est un phénomène d'ionisation de l'air. Le champ électrique très élevé par temps orageux entre les nuages et le sol ou la mer est encore amplifié à l'extrémité des pointes. Des électrons libres sont accélérés dans ce champ et ionisent les atomes de gaz qu'ils percutent en leur arrachant un électron ; ceux-ci émettent un photon de lumière en retombant à l'état neutre par absorption d'un électron.



f Le feu Saint-Elme brillant à la pointe des mâts du navire de Christophe-Colomb

Le premier millénaire de notre ère fut plutôt celui d'un relatif obscurantisme scientifique dans l'Europe du Nord ; pourtant dans le monde méditerranéen, la science arabe reprit le chemin tracé par les Grecs, progressa dans plusieurs domaines, mais abandonna toute spéculation sur le fonctionnement du monde. En effet, Averroès de Cordoue en avait une vision inspirée par Aristote, non conforme à la Vérité coranique, il fut exilé en 1190 au Maroc. Dans le monde ottoman qui suivit, seul comptait l'organisation militaire et administrative, comme chez les Romains, mais avec moins d'intelligence.

L'auteur d'une lettre de 1269, *Epistola de magnete*, révèle **Petrus Peregrinus** ou Pierre Pèlerin de Maricourt dont on sait peu de choses. Il a le mérite d'avoir fait le premier des recherches expérimentales sur l'aimant, identifier les deux pôles Nord et Sud, comment ils se repoussent ou s'attirent mutuellement et conclut que le côté de l'aiguille qui se dirige vers le pôle géographique Nord est attiré non pas par l'étoile Polaire comme on pourrait le penser, mais par un pôle céleste.

Son disciple fut le franciscain anglais **Roger Bacon** (1224-1294), considéré comme le fondateur de la science expérimentale, alternance de spéculations théoriques et d'expériences. Surnommé *doctor mirabilis*, il avait rassemblé toutes les connaissances scientifiques de l'époque dans trois *Opus*, avec peu de choses sur le magnétisme et l'électricité.

Les premiers pas au XVII^e siècle

Ce siècle n'était pas encore pour les sciences celui des Lumières, il débutait mal en 1600 pour Bruno Giordano, adepte trop affirmé de l'héliocentrisme de Copernic, auquel il rajoutait l'hypothèse de l'existence d'autres soleils avec planètes et d'un univers infini. C'était trop d'entorses à la Vérité biblique et se termina sur le bûcher à Rome. Galilée, plus prudent et ami du pape, ne fut condamné en 1633, qu'au retour chez lui, en « résidence surveillée » pour se taire.

L'inquisition papale ne pénétrait pas dans les pays de la Réforme, c'est alors en Europe du Nord et en Angleterre que la réflexion scientifique commença à s'épanouir.

Ainsi le premier livre traitant du magnétisme et accessoirement de l'électricité était édité en 1600 à Londres par **William Gilbert**, médecin, *De Magnete, magneticisque corporibus, et de magnomagnete tellure...* Il influença Kepler, Francis Bacon, Newton et en particulier Galilée comme un modèle de la recherche expérimentale dans un domaine très nouveau. Gilbert proposait de nouvelles méthodes pour fabriquer des aimants plus pratiques que les pierres naturelles : frotter un barreau d'acier avec un morceau de magnétite ou placer longuement un barreau dans l'axe du méridien terrestre, puis le frapper au marteau ; l'érouissage conservait l'aimantation. Cet aimant perdait ses propriétés magnétiques si on le chauffait au rouge (3). Les Chinois semblent avoir pratiqué aussi ces méthodes, 2000 ans auparavant. Ses recherches sur le magnétisme terrestre l'amènent à conclure que la terre est un gigantesque aimant dont les pôles sont proches des pôles géographiques.

Pourtant, cela ne résolvait pas son grand projet initial : permettre aux marins de situer leur position, longitude et latitude, avec leur seule boussole. Il sera résolu un siècle plus tard, mais avec d'autres moyens, le sextant et des horloges de haute précision. Gilbert s'était aussi intéressé aux propriétés d'attraction de l'ambre frottée, en remarquant qu'elles étaient bien différentes de celles de l'aimant. L'aimant a deux pôles, pas l'ambre apparemment. Le magnétisme ne se manifeste qu'avec deux corps, la pierre naturelle, la magnétite, et le fer, alors que l'ambre influe sur de nombreux corps. L'ambre perd son action avec l'humidité, pas l'aimant. Il propose d'appeler *vis electrica* la force d'attraction de l'ambre, l'*elektron* des Grecs, et recense toutes les matières qui s'électrisent comme l'ambre et celles qui ne le peuvent pas.

On en savait suffisamment sur le magnétisme pour près de deux siècles, jusqu'à Coulomb. Par contre, le phénomène de l'ambre frottée, baptisé maintenant *électricité*, nécessitait des approfondissements, mais il fallait un moyen plus pratique que le frottement de l'ambre avec une peau de chat pour le produire.

Ce fut à Magdebourg, en Saxe, vers 1640, que l'embryon d'une machine conçue par **Otto von Guericke** pour un usage astronomique, manifesta par hasard des propriétés électriques. Cet esprit pratique, loin des spéculations philosophiques, cherchait à comprendre, uniquement par des expériences, les forces qui actionnaient le carrousel des corps célestes étudié par Copernic, Kepler et Galilée. D'abord le vide qui devait régner dans l'espace pouvait-il propager la lumière des astres sans support matériel ? C'était le premier questionnement sur la nécessité de l'*éther*.



j Expériences de Guéricke d'attractions électriques 1762

Il inventa pour le vérifier la pompe à vide avec piston et l'utilisa accessoirement pour la célèbre expérience des sphères de Magdebourg : le vide était fait dans une boule formée de deux demi-sphères jointives qu'il était ensuite impossible de séparer, même en attelant huit chevaux de chaque côté.

Il pensait que les forces qui attiraient entre eux, soleil, planètes et lune, devaient avoir quelque chose de commun avec les forces magnétiques, électriques ou la lumière, et vérifia qu'elle se propageait bien dans le vide relatif obtenu avec sa pompe.

De Guericke construisit alors une maquette dont la terre et le soleil étaient figurées par des boules, la terre était en soufre, supposé en être le matériau principal, et tournait sur un axe horizontal. Lorsqu'il faisait tourner la boule à la main il s'aperçut qu'elle attirait les poussières et brins d'herbe comme l'ambre. Une plume restait accrochée à la terre simulant peut-être la lune ? Dans l'obscurité, des lueurs et aigrettes apparaissaient aussi sous sa main (j). Ces multiples expériences sont consignées dans *Expérimenta nova Magdeburgica de vacuo spatio* (1672).

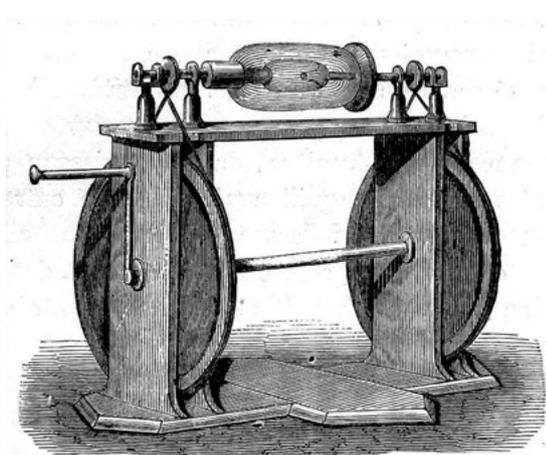
Quelques auteurs, pensant qu'il s'agissait de la première machine électrique, ont ajouté sur leurs gravures une manivelle, absente sur le mémoire original.

De Guericke décède en 1686, l'année où **Newton** présente à la Royal Society la gravitation, solution du problème qu'il avait exploré expérimentalement (4). C'était difficile de comprendre l'univers avec une maquette à petite échelle humaine. Newton, lui, avait eu selon la légende son éclair de génie en faisant la sieste sous un pommier (5). La publication de *Principia* en 1687 reste une grande date dans l'histoire des sciences, comme pour l'homme qui avait enfin compris pourquoi il restait rivé à la terre et avait du mal à voler. En vrai scientifique, Newton n'affirme pas une Vérité, « les choses se passent comme si la matière attirait la matière », mais propose un modèle de compréhension de l'Univers... jusqu'à ce qu'Einstein en propose un autre plus élaboré.

La gravitation est la première découverte de l'une des quatre forces fondamentales qui régissent la matière et l'énergie de l'univers, la plus faible, mais l'on n'a toujours pas découvert son mode d'action, le graviton ? peut être cousin du photon, porteur de lumière (6). Les chercheurs en électricité furent très influencés par la loi de Newton, l'attraction mutuelle des masses en fonction de l'inverse du carré de leur distance ; Coulomb confirmera cette analogie.

Le XVIII^e, siècle de l'électrostatique (7)

Jusqu'à-là, les phénomènes électriques n'avaient soulevé qu'un intérêt limité, ne proposant aucune application ; puis la curiosité s'éveille et les découvertes vont s'accélérer tout au long du siècle. Pour les physiciens, l'électricité va même reléguer au second plan l'optique et la mécanique qui avaient déjà acquis une certaine maturité.



k Machine de Hawksbee

Ce fut d'abord une suite de petites découvertes et inventions d'appareils pour les expériences, dont chacune n'est pas un événement considérable, mais qui réunies, forment progressivement le corps d'une nouvelle science, le comportement de l'électricité au repos. L'ensemble sera ponctué de trois avancées significatives, la bouteille de Leyde, le paratonnerre et la quantification de l'électricité et du magnétisme par Coulomb.

Newton, en tant que président de la Royal Society, avait embauché **Francis Hawksbee** pour classer les instruments de physique. En déplaçant un baromètre de Torricelli, de faibles luminescences bleutées apparaissaient dans la partie supérieure vide, lorsqu'elle est agitée. Pour mieux étudier le

phénomène, il fabrique en 1709, un appareil pour tourner à la main un cylindre de verre contenant du mercure et vidé d'air, mais avec une pompe à piston (k). Par analogie avec l'expérience de Guericke, le cylindre fermé est entouré d'un second. En tournant la manivelle et frottant ce cylindre avec l'autre main, il fait apparaître plus fortement les lueurs.

En effet, ces luminescences, que beaucoup d'autres étudieront ensuite, apparaissent mieux dans un vide partiel. Ces effets sont consignés dans *Physics Méchanical Experiments* (1719). Il fit de cette machine une variante dans laquelle le cylindre était remplacé par une simple boule de verre, entraîné

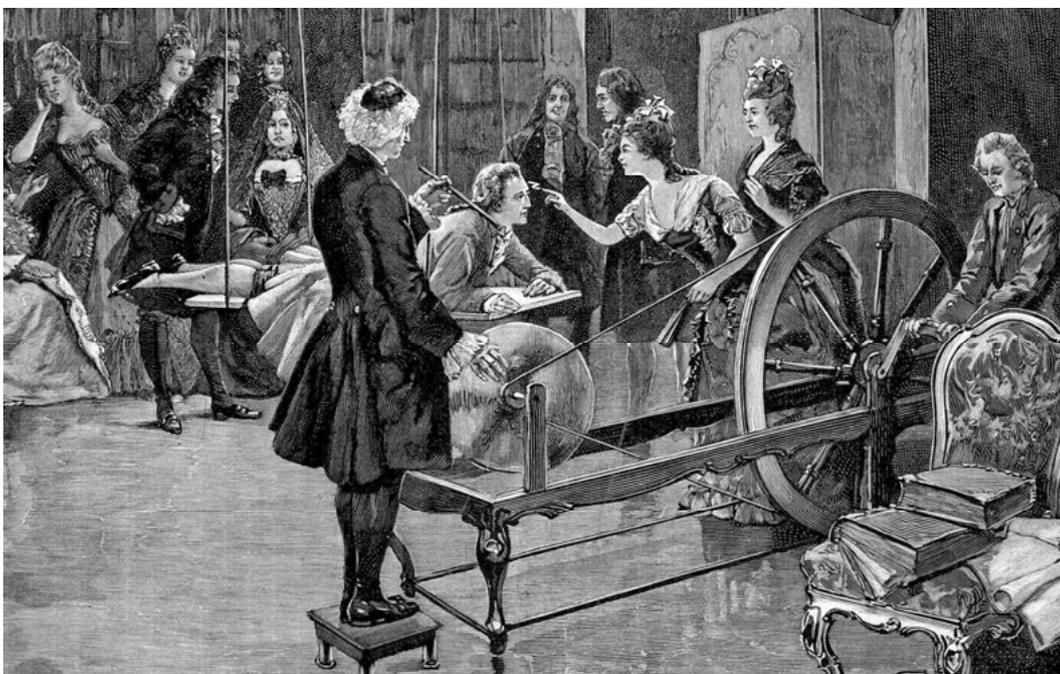
par un système de courroies, qu'on frottait avec la main sèche. Ce fut la première machine électrostatique, utilisée pendant des années.

En 1729, **Étienne Gray** de Canterbury, utilisant un simple tube de verre frotté, découvrit que le fluide électrique pouvait se transmettre loin, jusqu'à 30 mètres, au bout d'une corde de chanvre humide. Ce tube que l'on frottait avec la main sèche ou du papier était une machine électrique portative qui fut employée pour les expériences à l'extérieur. Avec son ami Wheler, il différençia des corps *conducteurs*, *non-électriques*, ne gardant pas l'électricité et les corps *isolants électriques*. Verre, soufre, résine, porcelaine étaient classées comme isolants ; métaux, solutions acides ou salines, corps humain et animaux comme conducteurs. Il constata un phénomène important, l'électrisation par influence, la *vertu électrique*, ce pouvoir d'attirer des plumes, se transmettait sans aucun contact par l'approche d'un corps électrisé d'un autre qui ne l'était pas initialement

Les Français commençaient aussi à s'intéresser à l'électricité, et le 12 septembre 1733, **Charles François Cisternay du Fay** présentait à ses collègues de l'Académie royale des Sciences une première théorie de l'électricité :

« Ce principe est qu'il y a deux sortes d'électricité fort différentes l'une de l'autre : l'une que j'appelle électricité vitrée et l'autre électricité résineuse. La première est celle du verre, du cristal de roche, de pierres précieuses, du poil des animaux, de la laine et de beaucoup d'autres corps. La seconde est celle de l'ambre, de la gomme copale, de la gomme laque, de la soie, du fil, du papier et de nombre d'autres substances.

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 de l'électricité vitrée, et au contraire il attire tous ceux de l'électricité résineuse....Il est probable que ce principe nous conduira à la découverte de beaucoup d'autres choses. »



1 Expériences électriques de Nollet dans les salons parisiens

Par exemple la conductibilité des flammes qu'il constata en 1736, ce que nous appelons aujourd'hui les gaz ionisés ; puis l'invention de l'*électroscope*, premier appareil de mesure de la force électrique. C'était tout simplement une aiguille, piquée sous le bouchon d'un vase et portant dans son

chas un fil dont les deux brins pendaient dans le vase, les protégeant ainsi des courants d'air. Lorsqu'on touchait l'aiguille avec un corps électrisé, les deux brins, chargés de la même électricité se repoussaient en formant un angle d'autant plus grand que la force électrique l'était elle-même

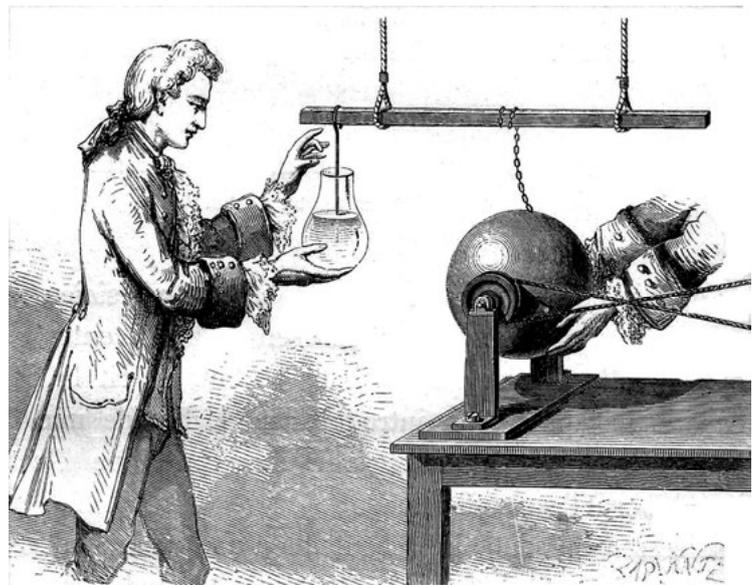
Du Fay remarqua que tous les corps étaient électrisables, pas seulement les isolants ; les métaux conducteurs étaient aussi électrisables à condition des les isoler. Il fut le premier homme *électrisé* : pour vérifier qu'il pouvait attirer lui-même des bouts de papier, il s'était perché sur un trapèze pendu au plafond par des cordons de soie, après avoir bien frotté les mains sur la boule de verre d'une machine électrique. Son jeune assistant, l'abbé Nollet, touche par hasard sa jambe, faisant ainsi jaillir la première étincelle électrique entre deux êtres humains (1).

La bouteille de Leyde (1746)

Combien de découvertes ne sont que des redécouvertes, quand elles sont *dans l'air du temps* ? Celle du condensateur en est un premier exemple dans le domaine électrique. Bien d'autres suivront.

À Cammin, en Poméranie, le 11 octobre 1745, **Georg von Kleist** tenait à la main un verre médicinal bleuté rempli d'esprit-de-vin, dans lequel trempait une tige de fer, reliée à la machine électrique ; il touche la tige et reçoit une forte secousse. Il signale le fait à son collègue, le Dr. Lieberkühn de l'Académie de Berlin et d'autres personnes, mais la nouvelle ne se propage pas.

Quelques mois plus tard, à l'université de Leyde, aux Pays-Bas, le 7 avril 1746, le professeur **Pieter Van Musschenbroek**, son collègue Allaman et un assistant Cuneus (ou Kunäuss) cherchaient le moyen d'éviter la perte progressive de *force* que présentaient les corps électrisés. Peut-être faire plonger l'extrémité d'une tige reliée à la machine dans un vase plein d'eau serait une solution ? L'un d'eux tournait la machine et le professeur tenait le vase d'une main, de l'autre il voulut retirer la tige plongeant dans le vase et éprouva une violente secousse qui allait rester mémorable dans l'histoire de la science électrique. (m)



m

Expérience de la bouteille de Leyde

Il écrivit à Réaumur et Nollet en France, à **Winckler** de l'Université de Leipzig, sans doute aussi en Angleterre à Londres et à Bologne en Lombardie :

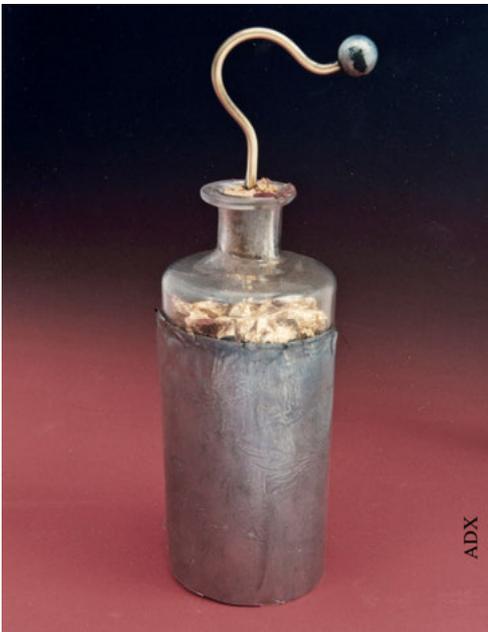
« Tout d'un coup, ma main droite fut frappée avec tant de violence, que j'eus tout le corps ébranlé comme d'un coup de foudre... en un mot, je croyais que c'était fait de moi. »

Winckler, lui, fut pris de tremblements nerveux et d'hémorragies nasales.

L'**abbé Nollet** lut devant l'Académie des Sciences de Paris la lettre de Musschenbroek, assortie de ses propres impressions, après avoir répété courageusement l'expérience : son corps s'était plié, il resta la bouche ouverte, respiration coupée et son index qui tirait l'étincelle reçut une piqûre très violente.



n Nollet électrise une compagnie de gardes



o Bouteille de Leyde



p

Les Parisiens se sont alors empressés au cabinet de Nollet, au Collège de Navarre où il enseignait, pour recevoir la fameuse décharge. Devant l'affluence il découvrit que l'effet était le même s'il le communiquait à plusieurs personnes se donnant la main. Cela résorba la file d'attente ; mais l'évènement parvint jusqu'à Louis XV qui demanda à voir la démonstration à Versailles. Nollet électrisa donc simultanément une compagnie de 240 soldats se donnant la main et dut recommencer dans un couvent sur 600 moines.

Il la baptisa *bouteille de Leyde* (o). Cette bouteille fut à l'origine d'un légitime enthousiasme pour les phénomènes électriques chez les physiciens, mais plus surprenant dans le public érudit. Chacun voulait recevoir la décharge, pour l'instant peu dangereuse, sauf pour quelques animaux et oiseaux sacrifiés à la science. Un inventeur fit rapidement fortune en vendant sa *bouteille d'Ingenhousz* portable, une bouteille que l'on chargeait avec un ruban de soie enduit de résine, frotté avec une peau de chat.

C'était magique pour le public des bateleurs de foire, ou pour étonner les amis dans les salons.

Pour les *philosophes*, les physiciens, ils disposaient d'une source d'électricité beaucoup plus puissante que leur machine classique à boule de verre frotté. La bouteille fut rapidement améliorée par Nollet, Bevis, Watson : l'eau intérieure remplacée par des clinquants de cuivre ou d'or, la main à l'extérieur remplacée par une feuille d'étain collée au verre ; la forme de la bouteille n'avait pas d'importance, sinon avoir une grande surface, telle une *jarre*.

La tige de fer était remplacée par une tige de laiton recourbée avec une boule au bout. On découvrit à cette occasion les deux schémas élémentaires des futurs circuits, mise en série, *en cascade*, ou mieux en parallèle, *en quantité*. Les jarres groupées par quatre ou plus dans une caisse constituaient de puissantes batteries (p)

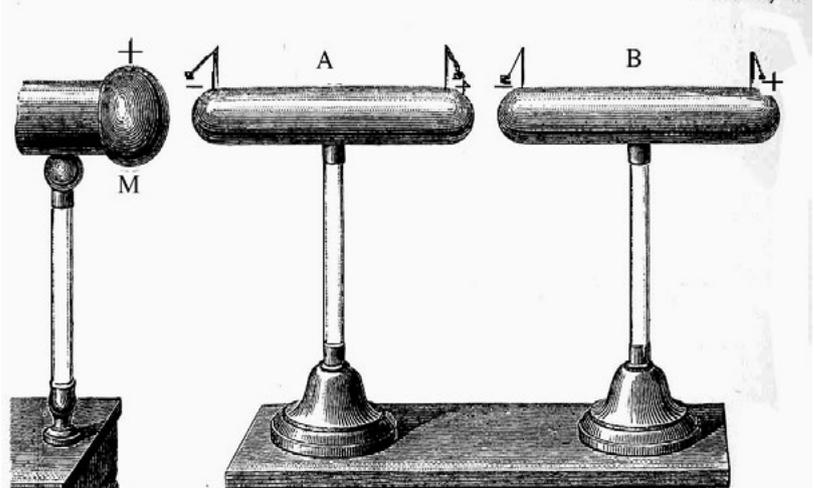
Mais on ne comprenait pas pourquoi cette bouteille donnait des commotions beaucoup plus fortes que la machine qui l'avait chargée.

John Canton étudia en 1753 un deuxième procédé, autre que le contact, pour transmettre de l'électricité : *l'influence* ou induction électrostatique, signalée par du Fay. Sur la figure (q) on constate que l'approche d'un corps A chargé d'électricité résineuse (-), d'un cylindre conducteur B à l'état neutre provoque l'accumulation d'électricité vitreuse (+), sur le côté proche de A et l'inverse sur l'autre côté.

Ainsi le fluide électrique à l'intérieur de la bouteille provoquait par influence, à travers le verre, une accumulation d'électricité inverse sur la main ou la feuille d'étain extérieure, cette électricité provenant de la terre. C'était une avancée importante qui fut exploitée en particulier par Volta pour son électrophore et conduisit plus tard Faraday, puis Maxwell à la notion de champ électrique.

La bouteille de Leyde était la première découverte importante de cette période ; son nom définitif, le **condensateur**, ainsi que sa forme lui

seront donné un peu plus tard par Aepinus. Elle constitua l'un des éléments clé pour la future découverte de Volta. Mais c'est au siècle suivant que le condensateur se révéla un constituant essentiel.



q

Electrisation par influence

Le condensateur

C'est l'un des trois constituants des circuits électriques, les *dipôles passifs*. Les deux autres seront découverts dès que les connaissances et conditions d'expériences s'y prêteront :

– La *résistance*, quand on découvrira un courant permanent circulant dans un fil (après 1800).

– L'*inductance* sera perceptible dès que l'induction sera découverte (1831), mais vraiment comprise lorsque se développera le courant alternatif (1880 - 1890) où elle joue un rôle plus important même que la résistance.

Dans le condensateur, les charges électriques se *condensent* sur les deux conducteurs très rapprochés isolés par un mince isolant, le *diélectrique*. Le champ électrique élevé qui en résulte entraîne une accumulation d'énergie dans le diélectrique comme on le pressentait et Maxwell le démontra. Une relation fondamentale relie la quantité d'électricité Q condensée sur les plaques la capacité C et de la tension de charge V :

$$Q = CV$$

Sans l'exprimer sous cette forme, Volta en eut l'intuition pour construire son *électroscope - condensateur*. La capacité C (en microfarad) est proportionnelle à la surface S des plaques en regard, et inversement à l'espace E qui les sépare :

$$C = e \cdot S / E$$

Le type d'isolant est caractérisé par sa *permittivité* e , égale à un pour l'air ou le vide, deux à six pour certains liquides ou solides isolants. L'*énergie* accumulée dans le diélectrique exprimée par Maxwell est : $\frac{1}{2} C V^2$, ce qui explique que le choc provoqué par le contact simultané avec les deux bornes d'une bouteille de Leyde, véritable accumulateur d'énergie, soit beaucoup plus fort que le contact avec la machine qui l'a chargée.

Dans son utilisation courante, le condensateur chargé sous une tension continue bloque la circulation du courant après sa charge. Par contre, s'il est alimenté avec une tension alternative à 50 Hz, il se charge et décharge 100 fois par seconde, créant un *courant capacitif*, parfois parasite, parfois utile, le traversant en permanence.

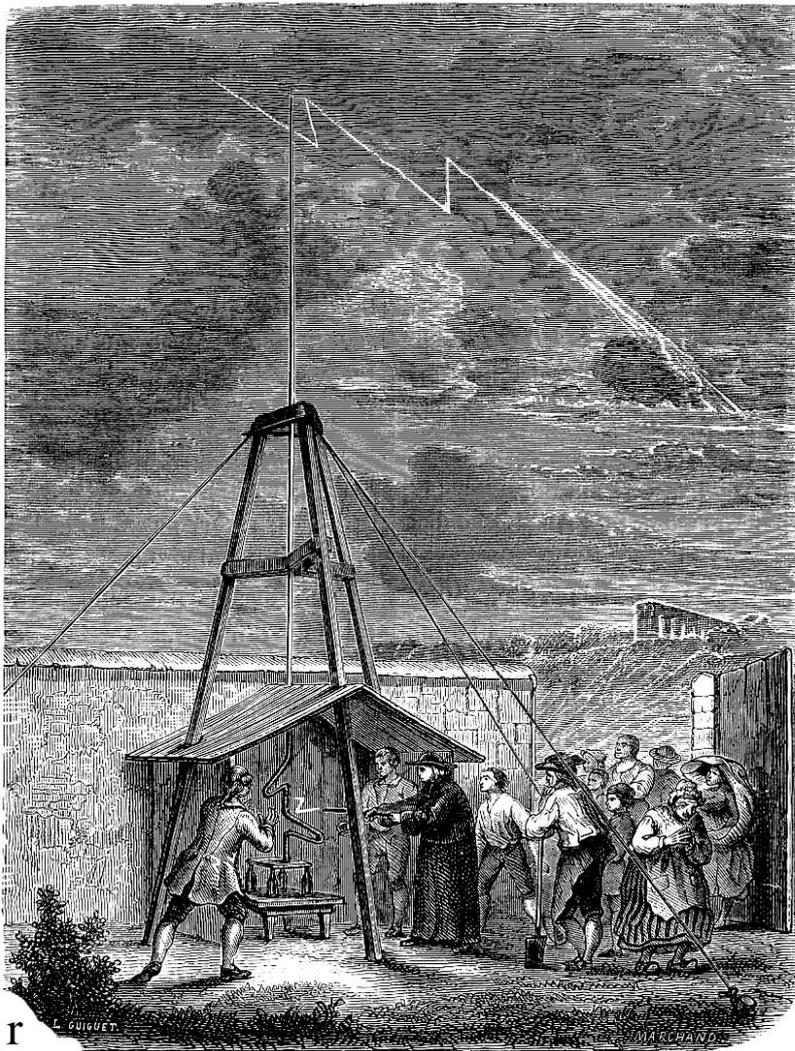
Au cours de ces années, se posa la question de la vitesse de propagation du fluide électrique. En France, l'expérimentateur fut Lemonnier ; il réalisa trois expériences pour conclure que la vitesse devait

être instantanée, au moins 30 fois celle du son. La compétition régnant entre les deux pays riverains du Channel, alors les Anglais Bevis, Watson et Cavendish firent aussi l'essai entre les rives de la Tamise et conclurent que la propagation de l'électricité sur une longueur de 12 276 pieds était instantanée.

Les expérimentateurs du siècle suivant mesureront une vitesse proche de celle de la lumière, près de 300 000 km/s dans le vide, vitesse plus réduite dans tout élément solide, liquide ou gazeux.

Le feu du ciel, le paratonnerre (1752 - 1760)

Déjà l'étincelle des machines suggérait une similitude, en miniature, avec l'éclair de la foudre. Quant à la bouteille de Leyde, elle fut considérée par un alchimiste comme « l'art de mettre la foudre en bouteilles ». Un nouveau personnage, **Benjamin Franklin**, allait entrer sur la scène scientifique, pour préciser cette idée, depuis la Pennsylvanie où ses activités en faveur de l'émancipation des colonies anglaises le mobilisaient beaucoup. Au cours de ce siècle, les conflits politiques se transposaient en filigrane sur le plan scientifique. Les Français avaient pris du retard sur les Anglais au début, les rattrapaient et firent aux idées et à la personnalité de Franklin un accueil dépassant leur intérêt réel, celui-ci n'étant pas du tout apprécié dans le pays de ses proches ancêtres anglais.



Expérience de Dalibard à Marly

Cependant, Pierre Collinson, membre de la Royal Society, tenait au courant son ami Franklin de l'évolution rapide de la nouvelle science, pour qu'il les communique à la petite société scientifique et littéraire de Philadelphie. Il lui envoie en 1747 une petite machine portable inventée par Gray, un tube de verre. Ce fut le début d'une correspondance que Collinson diffusait dans le vieux continent. Ces lettres très claires et argumentées étaient discutées dans les académies.

La cinquième, qu'il lut à Londres en 1750 à la docte assemblée, déclencha sourires et moqueries sur cet indépendantiste prétentieux, qui y soutenait avec vigueur l'hypothèse de la nature électrique de la foudre.

Mais comment le vérifier ? **Jallabert**, physicien suisse, avait étudié en 1748 ce *pouvoir des pointes*, de capter ou de diffuser alentour le fluide électrique.

Franklin reprit l'idée et proposait de planter sur une tour élevée une longue tige de fer pointue pour capter très haut le

fluide, si celui-ci était de même nature que l'électricité. L'idée était lancée, mais Franklin ne fut pas l'initiateur des expériences, organisées d'abord en France.

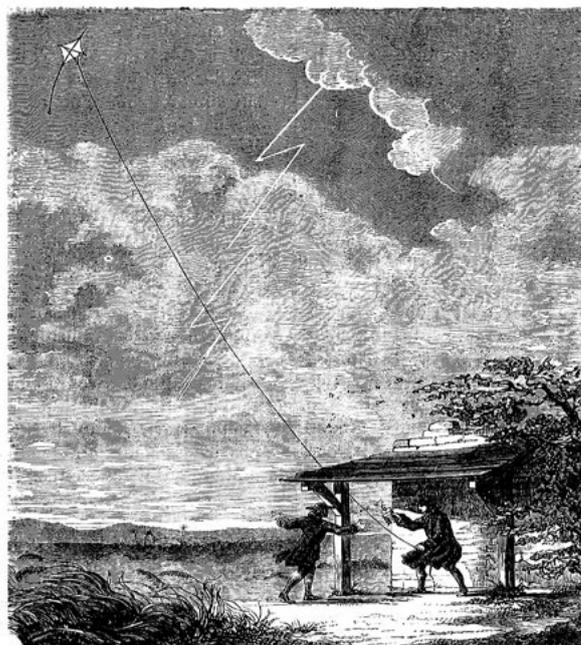
Buffon, célèbre naturaliste, conçut avec des amis physiciens l'expérience de captation de l'électricité de la foudre sur trois sites, compte tenu de l'incertitude d'apparition d'un orage : dans son château de Montbard, chez Delor sur un toit de Paris, et dans le jardin de Dalibard à Marly. C'est sur dernier site que se produisit la première et plus forte expérience de captage de feu du ciel, le 10 mai 1752. La gravure (r) représente l'installation d'une *verge* de fer haute de quarante pieds, maintenue par des bois et haubans isolants en fil de soie, pointue en haut et reposant en bas sur un tabouret isolé par des bouteilles. Une cabane permettait à l'expérimentateur de s'abriter de la pluie et de tirer des décharges du bas de la tige coudée en approchant un *excitateur*, tige de fer emmanchée sur une bouteille, pour la tenir. Un détail essentiel manque aussi bien sur la gravure que dans le texte du mémoire de Dalibard rapporté par Figuiet: il y avait certainement une chaîne métallique reliant l'excitateur à la terre pour écouler les décharges, sinon l'expérimentateur était foudroyé.

Dalibard n'était pas à Marly ce jour là ; son fidèle employé Coffier voit arriver l'orage et applique les instructions ; d'abord il commence à tirer des étincelles sensibles, puis il envoie vite chercher le curé Raulet et des paysans pour témoigner. Celui-ci courageux tire de forts éclairs bleuâtres dégageant une odeur de soufre, de l'ozone, ceci par six fois, « le temps de réciter un Pater et un Ave ». La scène avait une étrangeté diabolique, de quoi inquiéter les villageois, un curé tirant comme Moïse le feu du Ciel dans le fracas de l'orage, les claquements d'étincelles de 30 cm, l'odeur de soufre et de plus, brûlé au bras sans qu'il l'ait réalisé. Le curé envoie aussitôt un compte-rendu à Dalibard, qui le transmet à Buffon. La nouvelle émanant d'un savant de la réputation de Buffon produit une forte impression dans le monde scientifique, surtout que les terrifiantes langues de feu de Marly se sont renouvelées peu après chez Delor et au château de Montbard.

Romas, juge à Nérac, passionné d'expériences électriques pensait faire mieux et capter plus haut le fluide de l'orage, en adaptant une pointe en fer au sommet d'un cerf-volant retenu au sol par une longue corde conductrice. Il communique ce projet à l'Académie de Bordeaux, mais faute d'orage, il ne peut le réaliser que le 7 juin 1753. Avec une corde de 260 m de long, les effets obtenus sont encore plus spectaculaires que ceux de Marly, l'année précédente.

Les expériences se multiplient dans tous les pays, mais Franklin, l'initiateur de l'idée est absent et silencieux au milieu des discussions qu'elles entraînent dans le monde des physiciens et dans le public. À Turin le père Beccaria, Lemonnier à Paris font des études et expériences pour approfondir les connaissances sur l'électricité atmosphérique par temps calme comme en situation orageuse.

Franklin avait pourtant fait, lui aussi, un essai en septembre 1752 avec un cerf-volant relié au sol par une corde de chanvre, à laquelle était attachée une clef, elle-même reliée à la main de l'opérateur par un cordon de soie. (s) Les nuages orageux n'étaient pas très développés, rien ne se produisit jusqu'à ce que la pluie tombe et mouille la corde devenue ainsi conductrice. Franklin tirait seulement quelques étincelles en touchant directement la clef avec le doigt. Une erreur qui lui aurait été fatale si l'orage avait été plus fort, car dans les expériences précédentes mieux préparées, on touchait le bas de la tige de fer avec un excitateur, bien isolé de la main par une bouteille.



s Expérience de Franklin à Philadelphie n.

L'inconscience de Franklin aurait pu avoir une conséquence fatale pour lui-même, et surtout pour l'indépendance des États-Unis. Cette expérience avait été faite en secret, avec la seule aide de son fils

et signalée seulement en janvier 1753 à Watson, puis à Nollet. La raison de cette discrétion excessive était, semble-t-il, la crainte d'un échec qui aurait provoqué les railleries des Anglais ; ce n'était pas tant son image sur le plan scientifique qui lui importait, mais celle du diplomate dont les responsabilités étaient autrement plus importantes. Franklin ne fit aucun commentaire sur les expériences d'Europe, confirmant pourtant bien sa théorie.

Ces expériences étaient très dangereuses, la foudre représente en énergie des millions de bouteilles de Leyde. En août 1753, **Richmann**, physicien de St Petersburg fut le premier électrocuté pour l'avoir ignoré (t).



t Richmann foudroyé



u Le tonnerre en boule

Son expérience était analogue à celle de Dalibard, avec en plus un électromètre spécial pour mesurer la force de la décharge. L'orage était si puissant, qu'avant même les essais, s'approchant trop près, à un pied de la tige « un globe de feu bleuâtre » s'en échappa et le frappa au front. Il tomba raide mort.

Le témoin qui lui aussi fut renversé était Solokow, un graveur sur lequel Richmann comptait pour faire une gravure reproduisant bien ce qu'il avait vu. On a écrit que la cause de l'accident était l'excès d'isolement de la tige. Ce n'est pas très plausible, il s'agissait probablement d'une rare manifestation de la foudre en boule (u), phénomène encore inexpliqué aujourd'hui, faute d'arriver à bien le reproduire en laboratoire

Choc électrique

Les machines électriques à frottement engendraient des tensions très élevées, des dizaines de milliers de volts, jusqu'à cent mille volts, mais le courant qui transitait par l'étincelle de décharge était très faible, de l'ordre de quelques milliampères (mA) pendant un temps très bref, de l'ordre de la milliseconde. L'énergie mise en jeu était donc très faible. Aussi, toutes les expériences où le fluide traversait le corps étaient sans danger. Par contre la décharge de la bouteille de Leyde pouvait atteindre 20 ou 30 mA, suivant la tension de charge de la machine ; estimation basée sur les effets ressentis tels qu'ils nous sont rapportés. Actuellement, un instrument banal, l'allume gaz piézo-électrique, dénommé à tort électronique, génère des tensions de plusieurs milliers de volts, sans danger.

C'est seulement en 1760 que Franklin fit élever le premier paratonnerre sur la maison d'un marchand de Philadelphie, une tige de fer pointue de neuf pieds de hauteur et d'un demi-pouce de diamètre reliée au sol par d'autres tiges.

Par chance, un orage survint peu après, la pointe du paratonnerre fut retrouvée fondue, une partie de la tige descendant à la terre aussi et la maison épargnée.

Le paratonnerre était inventé et remplissait bien sa fonction. Il y avait pourtant une antériorité. Des voyageurs revenus de Chine rapportèrent que là-bas toutes les constructions hautes avaient au sommet des tiges de fer, reliées au sol par des chaînes, en particulier, la tour en porcelaine de Nankin, édifiée depuis quinze siècles (9).

Que n'ont donc pas inventé les chinois ?

L'installation de paratonnerres fut diversement et longuement discutée dans les années qui suivirent. Parmi les opposants, les Anglais ne pouvaient admettre qu'un émigré lointain, champion de l'indépendance des futurs États-Unis leur apprenne quelque chose, dans une science dont ils avaient été les pionniers. Aussi ils équipèrent leurs navires de paratonnerres avec une boule à l'extrémité, erreur qui nécessita de les remplacer par des pointes quelques années plus tard.

En France, Nollet, célèbre vulgarisateur, la référence en matière d'électricité, fait campagne contre ce paratonnerre, il avait pourtant soutenu la possible identité de la foudre avec l'électricité. Ce n'était sans doute qu'une jalousie personnelle avec Franklin, dont la subite popularité lui portait ombrage. Mais les faits s'imposaient et cet engin devint par surcroît l'objet d'une nouvelle mode, tel le parapluie à pointe avec fil de mise à la terre (v).



v para - pluie et tonnerre

Franklin publia l'ensemble de ses travaux en 1774, « *Experiments and observations on electricity*. » Peu après, en 1776, il traverse l'Atlantique pour venir en France qui l'accueillit avec enthousiasme en tant qu'ambassadeur des colonies anglaises d'Amérique du Nord. Elles venaient de promulguer leur déclaration d'indépendance et cherchaient l'appui de Louis XVI dans leur conflit avec l'Angleterre.

L'homme avait avancé dans sa compréhension de la nature, la foudre est de nature électrique et il était même possible d'en limiter partiellement les dégâts. Pourtant, les physiciens, Lemonnier, Franklin, Beccaria, Canton, Cavallo, Volta, de Saussure, ne comprenaient pas comment se réalisait cette énorme accumulation d'énergie dans les nuages, déclenchant un éclair un million de fois plus puissant que la fugitive étincelle de leurs machines électriques.

La foudre (10) est un phénomène maintenant bien connu, sauf l'une de ses manifestations, rare, la **foudre en boule**, restée toujours inexplicée. L'éclair se déclenche sous des millions de volts, générés par le brassage intense d'air chaud dans les cumulus, le courant atteint 10 000 à 50 000 A, rarement plus, et sa durée est inférieure à la milliseconde. L'énergie dissipée, bien que provoquant des dégâts spectaculaires, n'atteint en moyenne que 300 kWh par éclair. L'efficacité du paratonnerre est satisfaisante, à une réserve près, que la liaison avec la terre soit assurée par un conducteur de forte section, peu résistant, pour ne pas fondre sous l'effet du fort courant fugitif.

A la fin du XIX^e, on comprit que cette décharge était oscillante à haute fréquence ; par conséquent, ce n'était pas seulement la résistance qui devait être faible pour toutes les mises à la terre contre les surtensions, mais aussi la réactance, c'est-à-dire l'impédance de liaison. On sait que l'installation d'un *parafoudre* contre les surtensions n'est efficace que si la liaison à la terre a une réactance faible.

Jusqu'au XIX^e siècle, la population étant essentiellement rurale, occupée aux travaux extérieurs, il y avait en France plus d'une centaine de morts par an, et trois fois plus d'animaux. Actuellement, il n'y a plus que 20 à 30 morts par an. La foudre tombe très rarement sur les citadins.

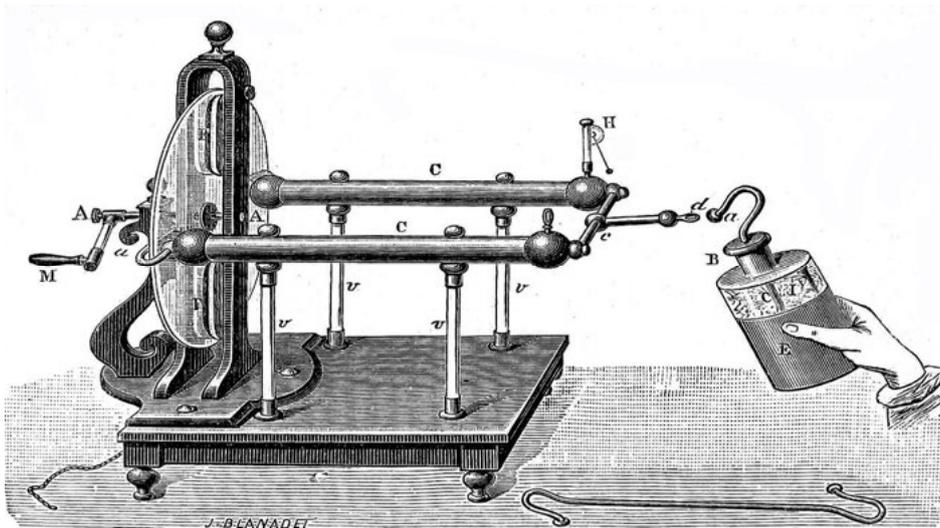
Les machines électriques (8)

La seule machine naturelle générant l'électricité statique est le brassage de l'atmosphère chaude, les jours d'orage, qui porte la base des nuages à des centaines de milliers de volts par rapport à la terre.

Générateurs d'électricité statique

Les gravures de ces appareils illustrent bien leur étrangeté. Assez rapidement les expérimentateurs avaient compris que le frottement entre deux corps arrachait, d'après du Fay, du fluide résineux à l'un, laissant sur l'autre du fluide vitré de nature opposée. Tout corps pouvait donc générer l'une ou l'autre des électricités et Franklin remplaça cette distinction par électricité négative, en moins, et électricité positive, en plus. Cette théorie des deux fluides supposait qu'ils résultaient de la dissociation par l'électrisation d'un fluide, unique à l'état de repos. Ces hypothèses n'étaient pas très éloignées de la réalité. On sait que le frottement arrache des électrons aux atomes de l'isolant, charges négatives alors rassemblées en surface.

La réalisation pratique de la machine à frottement évolua, mais la technologie de base se résumait à quelques constituants que l'on peut identifier sur la figure (x), représentant la machine de l'Anglais **Ramsden**, la plus répandue après 1768 :



x Machine de Ramsden chargeant une bouteille de Leyde

– Un corps frotté tournant, cylindre de verre, puis sphère et finalement un disque non-hygroscopique entraîné d'abord par la main, puis par une manivelle ;

– Un corps frottant, d'abord la peau de chat ou la laine, puis la main bien sèche, finalement des coussins bourrés de crin, en cuir métallisés par un amalgame de zinc ou or, reliés à une chaîne évacuant à la terre, *réserveur commun*, l'électricité

contraire à celle recueillie sur le corps frotté ;

– Un *collecteur*, chaîne ou tige touchant le corps frotté, le *conducteur* qui transmettait le fluide (à très haute tension) à l'objet, pour l'électriser. Dans la machine de Ramsden, c'était un ou deux peignes portant des pointes métalliques effleurant le disque, reliées au *conducteur*, grosses pièces en métal ou métallisées en forme de cylindres et boules supportées par des tiges isolantes.

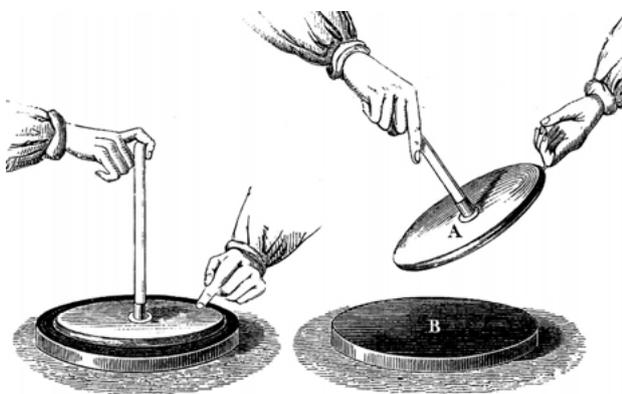
Sur le même principe, des machines semblables furent construites par Van Marum, Adams, Nairne ; cette dernière avait la particularité de recueillir les deux électricités contraires. Ces machines développaient des tensions très élevées, trente à cent mille volts, mais l'énergie étant très faible, le courant de l'étincelle de décharge était le plus souvent inférieur à quelques milliampères, donc sans danger. L'énergie apportée par l'opérateur se limitait à éloigner les charges de signe contraire, en s'opposant à leur force électrostatique d'attraction, un travail très faible. Même entraînée par un puissant moteur, une machine électrostatique ne peut produire qu'une infime énergie électrique. Il était impossible de faire mieux. Le seul moyen d'avoir plus d'énergie, donc de courant était de charger un condensateur, ce que démontra l'expérience de Leyde.

L'électrophore

Deux physiciens, Johann Wilcke, suédois, et **Alessandro Volta**, professeur à Pavie cherchaient en 1762 à utiliser le phénomène d'influence, transmettre l'électrisation sans contact, par approche d'un conducteur d'un corps électrisé.

Ils arrivèrent tous deux, mais par des voies différentes, à un appareil simple, mais surprenant, l'*électrophore*, un « porteur d'électricité » (y). Deux pièces le constituent : Une base circulaire creuse dans laquelle on moulait un gâteau de résine épais, lisse en surface et un disque en bois revêtu d'une feuille d'étain sur les deux faces que l'on peut tenir par une tige de verre isolant. La résine est battue avec la peau de chat, ce qui la charge en négatif.

Le disque d'étain est posé sur la résine, il se charge par influence en positif sur la face posée sur la résine, repoussant son électricité négative sur l'autre face. Avec le doigt, on touche cette face, l'électricité négative s'écoule à la terre ; le plateau reste ainsi entièrement positif.



Électrophore

les expériences de laboratoire.

On éloigne le plateau qui stocke de l'électricité transportable ailleurs, l'approche d'un doigt provoque sa décharge à travers une petite étincelle. Ce transfert peut recommencer indéfiniment en replaçant le disque sur la résine sans la frotter à nouveau, car elle a conservé toute sa charge.

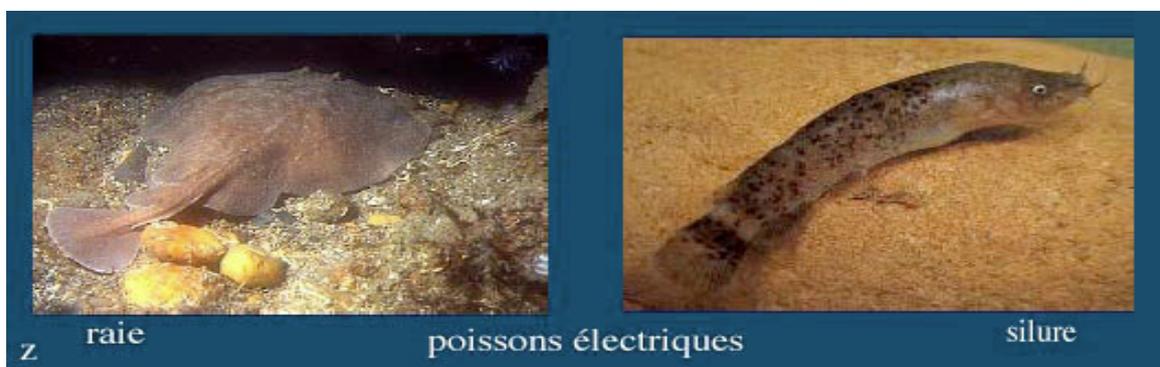
Cet électrophore était bien une petite machine pratique pour produire et transporter à la main un peu d'électricité statique.

Le phénomène d'influence fut utilisé au siècle suivant pour réaliser un autre type de machines pour

Les poissons électriques

Il n'est pas illogique de classer comme machine électrique la torpille, poisson connu depuis Aristote pour la secousse qu'il envoie si on le saisit. John **Walsh** conduit en 1772 à La Rochelle une série d'expériences et identifie avec Spallanzani l'organe qui génère ces secousses, analogues à celle de l'électricité. La torpille n'était pas unique, près d'une dizaine d'autres poissons électriques furent étudiés par les naturaliste (z).

Cette génération d'électricité par un animal intriguait, en particulier l'anatomiste Galvani qui l'étudia ensuite sur les grenouilles.



z

raie

poissons électriques

silure

Détecter et mesurer

Détecter un phénomène invisible aux effets très fugitifs était une gageure, quant à le mesurer, il fallait d'abord définir ce que l'on voulait mesurer. Au-delà de la secousse ressentie par les électrisés lors d'une décharge, les premiers détecteurs exploitaient la répulsion de deux corps chargés d'une électricité de même signe.

L'*électroscope* le plus simple était paire de petites boules de sureau suspendues par un fil de lin un peu conducteur ; dès qu'elles étaient chargées, elles se repoussaient,

Henley en fit un électromètre rustique sur ce principe, une boule de sureau était suspendue à une petite potence, elle-même fixée sur la pièce métallique dont on voulait mesurer la charge.

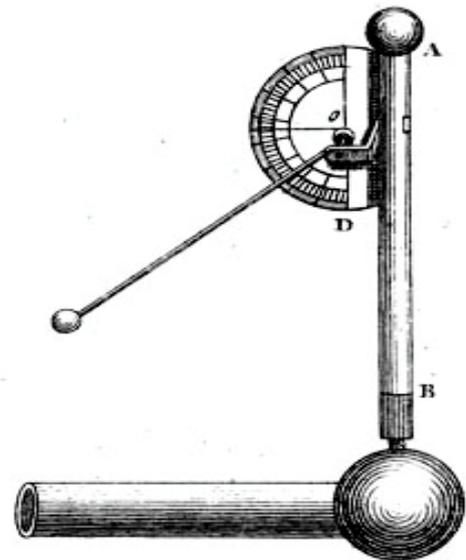
Sans électricité, la boule touchait la potence et dès qu'elle était chargée prenait une charge de même signe et s'en éloignait. L'angle que faisait le fil par rapport à la verticale donnait une indication relative. Pour la quantifier, une échelle graduée isolante en ivoire était fixée derrière le fil (za).

Le principe des électroscopes ordinaires était celui proposé par du Fay, l'écartement de deux fils conducteurs suspendus. Pour éviter les courants d'air, le système était suspendu au bouchon, à l'intérieur d'un flacon de verre. John Bennet l'améliora en remplaçant les fils par des petites feuilles d'or et en disposant à l'intérieur deux petites boules métalliques montées sur des tiges, elles-mêmes fixées sur l'embase du flacon et reliées au *réservoir commun*, la masse. Lorsque les feuilles s'écartaient, chargées d'électricité de même signe, elles étaient en plus attirées par les boules chargées d'électricité contraire (zb).

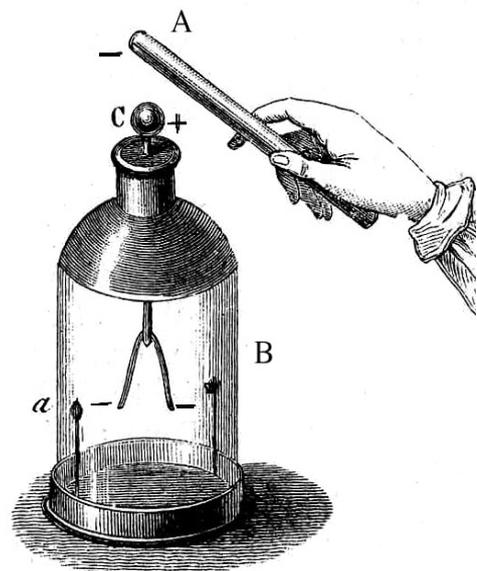
Quant à la mesure proprement dite, il faut attendre 1785 que Coulomb invente un véritable électromètre ultra sensible.

Pour connaître quelle était l'espèce d'électricité d'un corps chargé, positive ou négative, on le portait isolé au bouton supérieur de l'électroscope provoquant l'écartement des feuilles d'or. Ensuite on présentait au bouton un bâton de *cire d'Espagne* électrisé par frottement ; si la divergence des feuilles augmentait, le corps avait la même espèce de fluide que le bâton de cire, résineuse ou négative.

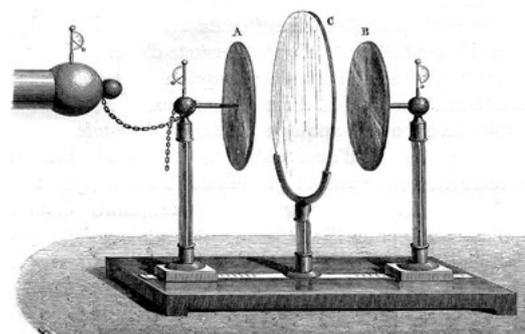
Si l'écartement des feuilles diminuait, le corps était chargé d'électricité contraire, vitrée ou positive. La couleur de l'étincelle était changeante suivant les corps sur lesquels elle prenait naissance, de même suivant le gaz et sa pression.



za Électromètre



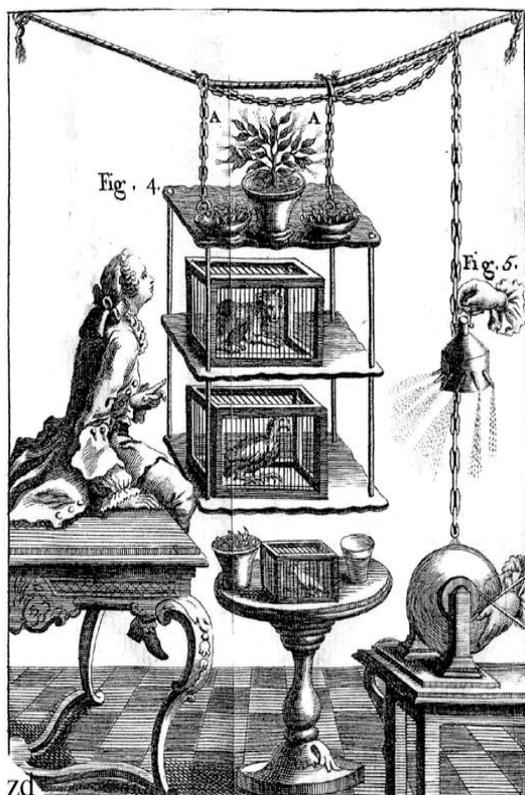
zb Électroscope



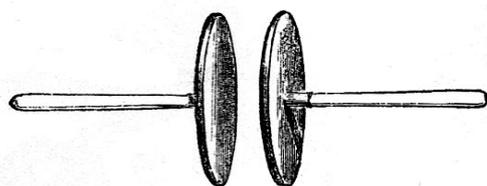
zc Condensateur d'Aepinus

Recherches sur l'Electricité 5^e Disc Pl. 2. Page. 402

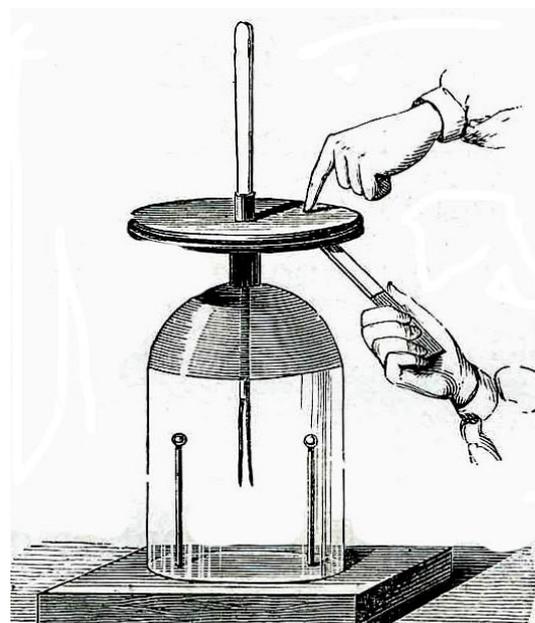
Les appareils d'expériences



zd



zf Condensateur de Volta



zg

Electroscope-condensateur

Un appareil important fut construit par **Aepinus** en 1759 (12). Constitué de deux plateaux métalliques montés sur une glissière, séparés par un plateau en verre ; c'était à peu près la bouteille de Leyde déroulée dans un plan (ze). siècle suivant pour réaliser un autre type de machines pour les expériences de laboratoire.

Avec ce dispositif, on pouvait faire varier certains paramètres : la distance des plateaux avec l'isolant et nature de cet isolant, les charges et décharges variées des plateaux, dénommés *collecteur et condenseur*. Aepinus fit ainsi avancer la compréhension du phénomène de *condensation* d'électricité sur les plateaux, résultant de la présence d'un isolant entre eux.

Le célèbre abbé Nollet se livrait à nombre d'expériences pour apprécier les effets de l'électricité; malgré sa persévérance aucun résultat notable n'en est résulté. Sur la gravure (zd) il électrifiait des plantes dont la croissance semblait s'accélérer, ainsi quedivers animaux, chat, pigeon, qui perdaient du poids après plusieurs heures (11).

L'électroscope - condensateur

En 1792, Volta était intrigué par le comportement de son électrophore (y) dans ses essais avec divers systèmes de disques isolants ou métalliques isolés entre eux. Il dénomma **condensateur** le système composé d'un disque métallique recouvert d'un isolant fin, du vernis, sur lequel était déposé un autre disque métallique, muni d'une tige de verre isolante pour le manoeuvrer. Ce n'était qu'une variante de forme de la célèbre bouteille et de l'appareil d'Aepinus (zf). Peut-être pour simplifier les opérations d'électrisation du disque inférieur et ensuite de la mesurer en la plaçant sur l'électroscope, il eut l'idée pratique de fixer ce disque directement sur le bouton de l'électroscope (zg).

Cette idée simple se révélera plus tard très féconde.

Pour mesurer l'électrisation d'une pièce, elle est d'abord mise en contact avec le plateau inférieur, on touche du doigt le disque supérieur pour le décharger à la terre. Après retrait de ces deux contacts, le disque supérieur se trouve normalement chargé d'électricité contraire à celle du plateau inférieur, mais les feuilles d'or s'écartent à peine. Le disque supérieur est alors soulevé à la main par la tige en verre, provoquant une forte déviation des feuilles d'or de l'électroscope témoignant d'une forte élévation de potentiel, qu'il ignorait.

C'était très surprenant pour Volta, pas pour nous qui connaissons la relation : $Q = CV$

Elle exprime que si l'on diminue la capacité C du condensateur, en soulevant le disque supérieur, la tension V augmente d'autant, la charge Q sur chaque disque restant constante.

Volta avait donc créé, totalement par hasard, un appareil capable d'amplifier un potentiel plus d'une centaine de fois.

À quoi pouvait-il servir à une époque où, selon notre langage, les tensions à mesurer avec l'électroscope se chiffraient en milliers de volts. A rien... si ce n'était huit ans plus tard.

Cet appareil, simple curiosité, allait jouer un rôle capital pour la découverte d'une autre électricité, la force électromotrice d'un volt de la future pile.

Un amplificateur de tension

Quand on mesurait le degré d'électrisation d'une pièce en la mettant en contact avec l'électroscope, on pensait mesurer une "force électrique", fluide indéterminé se présentant sous deux formes, positive ou négative. Des essais et les idées de ses prédécesseurs, Beccaria en particulier, amenèrent Volta à considérer ce processus avec l'analogie pneumatique d'un ballon de volume V , renfermant une quantité d'air Q , comprimé à la pression P . Le condensateur avait emmagasiné une charge Q , sous une pression P , ou *tension* T , proportionnelle à la *puissance condensante* V ou capacité C . Ce que résume la relation $Q = CV$ qu'il découvrit par cette analogie, sans l'exprimer bien sûr.

Ainsi l'électroscope ne mesurait pas directement une charge, mais la tension V avec laquelle on avait chargé le condensateur d'une quantité fixe Q d'électricité proportionnelle à sa capacité C . En soulevant le disque supérieur, la capacité diminue fortement, par exemple 100 fois, la tension s'accroît d'autant. Les charges qui étaient *condensées* sur le disque inférieur se répartissent sur les lames, elles se repoussent d'autant plus qu'elles sont attirées par les petites boules reliées à la terre sur lesquelles se concentrent par influence des charges opposées.

À noter que cette manœuvre nécessite une force mécanique, certes insensible, pour vaincre l'attraction des charges $+$ et $-$ des deux disques, et apporter une minime énergie au système.

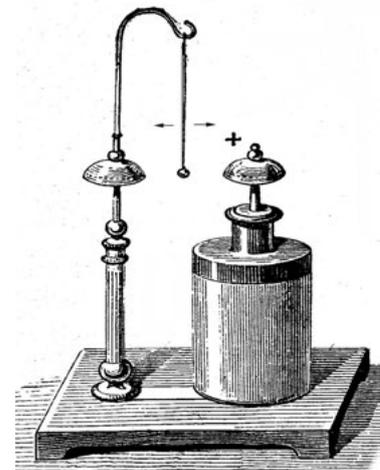
Apareils magiques

Faute de trouver des applications pratiques, si ce n'est le paratonnerre, les cabinets des physiciens étaient garnis de multiples appareils étranges, dont beaucoup illustraient d'une façon ludique l'une des propriétés de l'électricité statique. C'étaient le carillon électrique, le tableau magique, l'araignée électrique de Franklin, le tourniquet, le perce-verre, la danse des pantins, le pistolet de Volta, le carreau fulminant de Bevis, le tourniquet électrique, etc. (zc)

Électricité et chimie

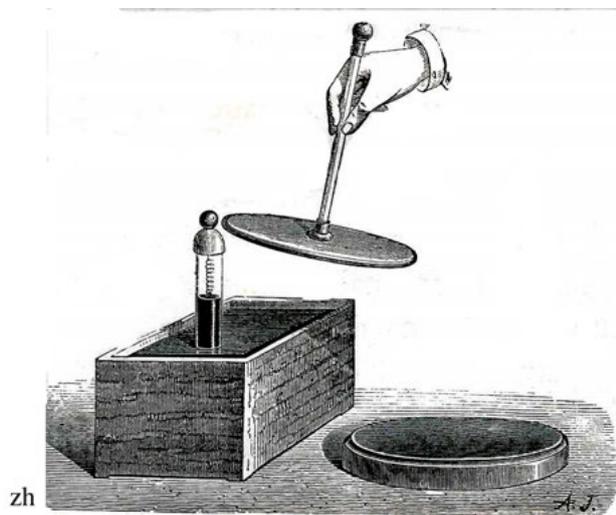
Il faudra plus d'un siècle pour découvrir progressivement que l'électricité est fondamentale pour assurer la cohésion comme la dissociation des atomes dans les molécules, c'est à dire la chimie. Pourtant les brèves étincelles de l'électrostatique ont révélé très vite leur pouvoir, en permettant la synthèse de l'eau.

Dès 1781, **Priestley**, puis **Cavendish** en 1783 avaient fait cette synthèse à partir de ses constituants, **l'air vital**, l'oxygène, et **l'air inflammable** ou **tonnant**, que ce dernier avait découvert et Lavoisier dénommé *hydrogène*, générateur d'eau. L'appareil utilisé, **l'audiomètre**, était celui que Volta avait fabriqué pour étudier le méthane, ce gaz des marais qu'il avait découvert (zh). Cela l'avait conduit à inventer aussi un **pistolet** détonnant par une étincelle dans l'hydrogène.



zc Carillon électrique

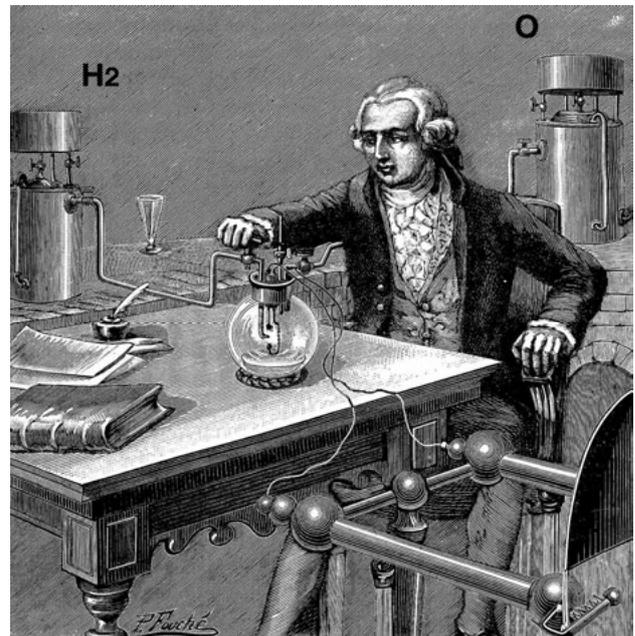
Cavendish avait aussi obtenu de l'acide nitrique, synthétisé par une étincelle déchargée dans le mélange azote et oxygène.



zh

zh

Eudiomètre



La synthèse de l'eau fut renouvelée en 1785 par **Lavoisier**, le père de la chimie, devant le public et avec une mise en scène spectaculaire. En effet, l'eau était d'abord décomposée sur du fer rouge à 800 °C, puis l'hydrogène et l'oxygène étaient stockés dans deux réservoirs, pour être ensuite recombinaison en eau par l'étincelle électrique. Première belle démonstration de :

« Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme. »

Cette synthèse sera aussi reproduite indirectement par William Grove en 1839, non plus par une étincelle électrique, mais inversement en produisant du courant électrique avec sa *pile à gaz* (II-1)

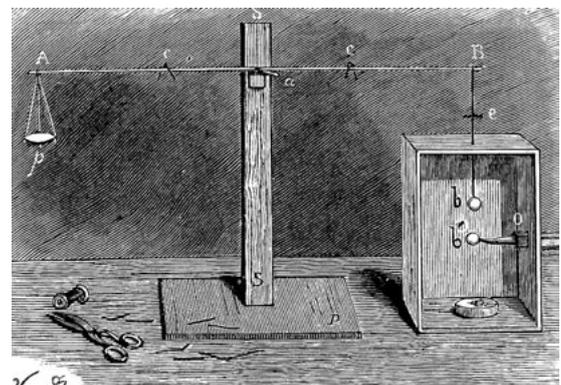
Coulomb, le point d'orgue final

En cette fin du XVIII^e siècle, l'essentiel des connaissances sur les propriétés de cette électricité statique était acquis. Plus proche d'une curiosité que d'une science, elle était restée qualitative, aucun des mathématiciens de l'époque ne s'y était intéressé.

Il fallait auparavant quantifier les phénomènes, mais on ne savait pas au juste quoi, avec quels appareils de mesure ?

Avec une balance classique, ces mesures étaient fort imprécises (zk) .

Ce fut alors l'apparition sur la scène électrique de **Charles Augustin Coulomb**, ingénieur du génie militaire, homme concret, éloigné des spéculations philosophiques, bien rodé à l'approche des problèmes pratiques par le calcul. L'académie des Sciences avait proposé en 1779 un concours sur l'amélioration de la fabrication des boussoles, Coulomb envoie son mémoire, « *Recherches sur la meilleure manière de fabriquer les aiguilles aimantées* ». Il gagne le prix avec Van Swinden, physicien hollandais. Dans ce travail, il avait été amené à concevoir des dispositifs d'essai constitués d'une aiguille magnétique suspendue à un fil dont l'angle de torsion était la base de la mesure.

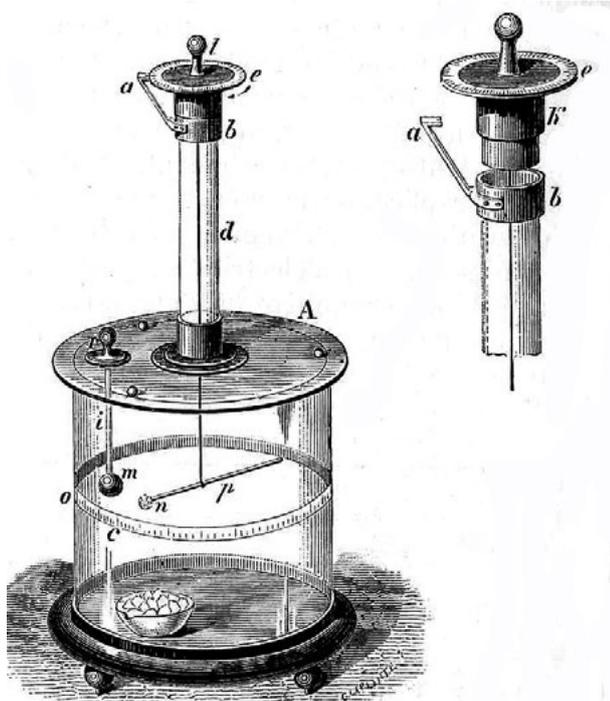


zk

Balance d'attraction

En mécanicien averti, il reprit méthodiquement cette question et publie en 1784 un mémoire sur le résultat de ses recherches : « *Recherches théoriques et expérimentales sur la force de torsion et sur l'élasticité des fils de métal* ».

Dès lors, il se propose de mesurer des forces très faibles en les équilibrant avec *la force de torsion* d'un fil. L'invention d'un appareil de mesure très sensible, une véritable balance en résulta et fit l'objet de son mémoire de 1785 :



Balance électrique de Coulomb

« Construction et usage d'une balance électrique, fondée sur la propriété qu'ont les fils de métal d'avoir une force de torsion proportionnelle à l'angle de torsion. »

Le cœur de la balance (zl) était le fil d'argent très fin suspendu en haut de la colonne D, dont la rotation se faisait par une bague C graduée sur 360°. La force d'attraction à mesurer entraînait la torsion élastique du fil vertical ; la mesure de cet angle donnait la valeur de la force. Dans le corps du cylindre A pendait au bout du fil une tige fine f en gomme laque, avec à l'une de ses extrémités, une petite boule métallique g et un contrepoids à l'autre. La tige verticale amovible de gauche se retirait verticalement par son bouton et portait une petite sphère g' qu'on électrisait. La mesure comportait une série de manœuvres délicates. Coulomb arrivait à sa première loi expérimentale :

« *Les attractions et répulsions électriques varient en raison inverse des carrés des distances qui séparent les corps électriques.* »

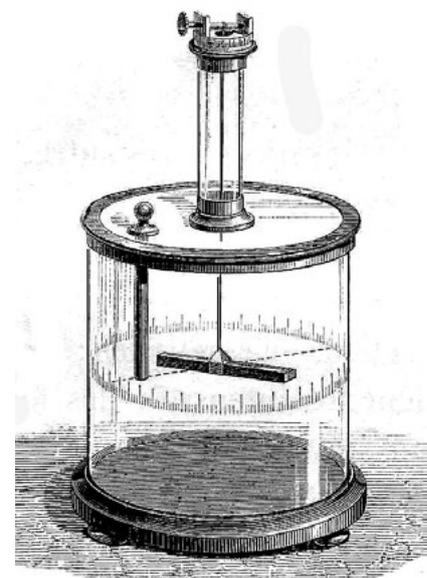
Mais ignorant la valeur de la charge électrique unitaire, Coulomb faisait deux mesures, l'une avec une charge donnée, l'autre avec la moitié de la première, il pouvait alors préciser :

« Les attractions et les répulsions sont en raison directe des quantités d'électricité dont les corps sont chargés. »

Une **balance magnétique**, (zm) conçue sur le même principe, permet d'établir la loi semblable pour les aimants (13). Ce ne fut pas une surprise, elle était pressentie depuis un siècle et proposée par Franklin, Priestley et Cavendish par similitude avec la loi newtonienne de la gravitation.

Pourtant, découvrir que les trois lois d'attraction à distance connues, entre masses (Newton), corps électrisés ou magnétiques (Coulomb) étaient identiques, incitait à rêver à l'unicité des forces naturelles, le Graal des physiciens de tous les temps.

Après ces brillants résultats, Coulomb poursuivit ses recherches en reprenant certains sujets étudiés par ses prédécesseurs pour les finaliser et quantifier si possible. Par exemple la distribution de l'électricité uniquement sur la surface des conducteurs, et surtout l'absence de toute influence électrique à l'intérieur.



Balance magnétique

Ce sujet classique avait été étudié par Nollet, Franklin, puis Beccaria et sera repris plus tard par Faraday, dont le nom est resté associé à cette *cage* métallique, dont l'enceinte peut être portée à un très haut potentiel, le champ électrique à l'intérieur restant nul. (zn). Il définit la notion de moment magnétique d'un aimant, celle de masse électrique, ce que nous dénommons la charge électrique. Surtout, il précisa la théorie des deux fluides électriques, positif et négatif et y ajouta celle de deux fluides magnétiques, eux aussi positif et négatif. Cela laissait présager qu'il y avait aussi des charges magnétiques. Ampère, en démontrant que le magnétisme était dépendant de l'électricité, rendait théoriquement impossible l'existence d'une charge magnétique, ce qui se confirma au XX^e siècle.

En moins de quatre ans, 1785 à 1789, Coulomb envoyait à l'Académie sept mémoires (14). La révolution le contraint à rester à Blois et ce n'est que plus tard que Denis Poisson, le meilleur élève du mathématicien Laplace, rassemble dans son mémoire de 1812 la théorie mathématique générale de l'électrostatique, basée sur les mesures de Coulomb.

Un demi-siècle plus tard, le savant anglais Lord Kelvin, pionnier de la mesure en électricité, écrivait :

« Si vous pouvez mesurer ce dont vous parlez et pouvez l'exprimer par un nombre, vous savez quelque chose de votre sujet ; sinon vos connaissances sont d'une pauvre espèce et bien peu satisfaisantes ; ce peut être là un commencement... »

En juste reconnaissance de cet apport significatif de Coulomb à l'électrostatique, la mesure, les électriciens adoptèrent en 1881 son nom pour identifier la quantité d'électricité. Dans le système international SI, le coulomb est une unité dérivée, exprimant la quantité d'électricité traversant un conducteur parcouru par une intensité d'un ampère par seconde.

Quand on découvrit l'électron, à la fin du siècle suivant, sa charge était infiniment plus faible :

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ coulomb}$$

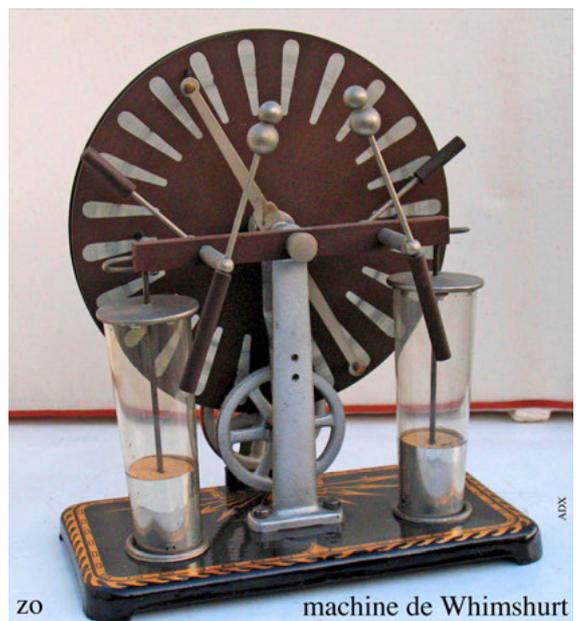
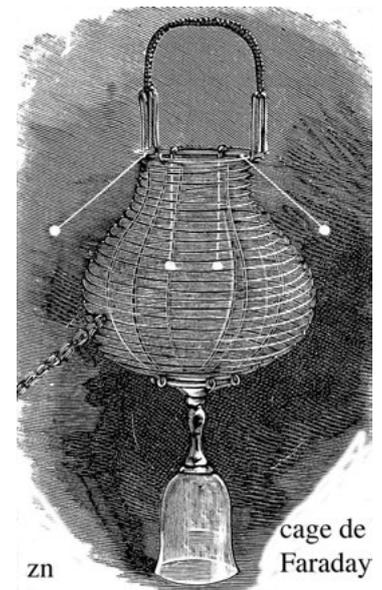
Bilan d'un siècle d'électrostatique

À la fin du siècle, les travaux de Coulomb ressemblaient plus à une brillante conclusion qu'à une ouverture vers de nouveaux développements :

– Sur le plan pratique, la seule application développée était le paratonnerre.

– Sur le plan théorique, les spéculations sur la nature de ce fluide électrique avaient suscité d'amples débats. Les physiciens étaient imprégnés de la philosophie cartésienne de l'unicité des forces primordiales ; les fluides lumineux, caloriques, électriques et magnétiques ne seraient que des aspects particuliers d'un principe universel.

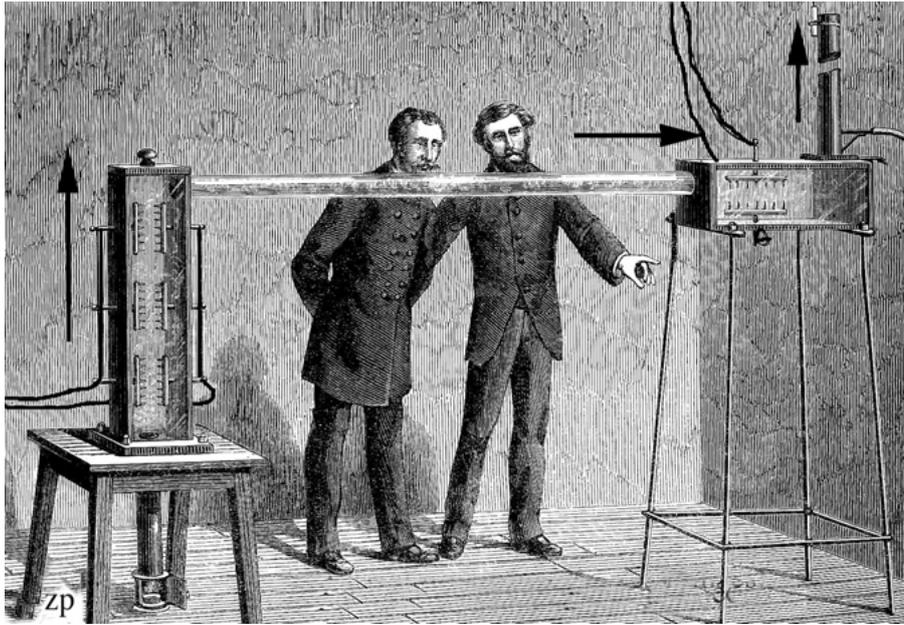
Franklin avait proposé l'hypothèse des deux fluides qui se manifestaient en quantité égale par l'électrisation, mais se recombinaient à l'état de repos. Nollet s'y était opposé sans justification claire. Puis Aepinus, Beccaria, Symmer et finalement Coulomb apportaient quelques nuances à cette hypothèse. Comme tout modèle physique, il expliquait convenablement les faits connus, mais ne proposait pas de vérifications



expérimentales nouvelles, sources de progrès. Cela n'avait finalement pas grande importance, l'avenir le montrera, comme pour nombre de phénomènes, la connaissance de la nature de l'électricité n'était pas nécessaire pour en découvrir l'essentiel des propriétés et les multiples applications.

Au cours des siècles suivants, l'électricité statique resta dans les laboratoires comme une science parachevée.

On inventa cependant au XIX^e de nouvelles machines originales, celle d'Armstrong utilisait la vapeur, celles de Carré, Holtz et de Winshurst, l'influence. Cette dernière trouva quelques débouchés pour soigner diverses maladies (zo).



zp Filtrage électrostatique des fumées

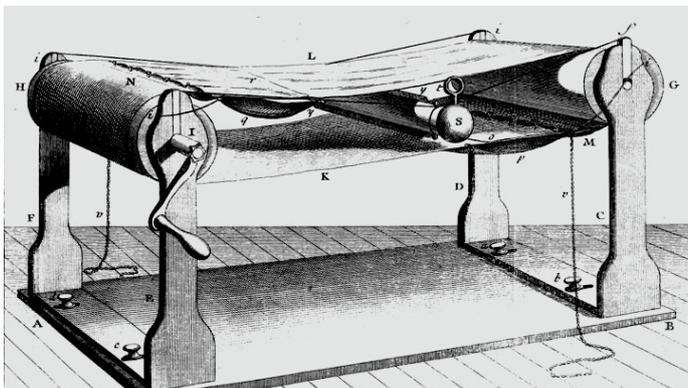
Une seule propriété de l'électrostatique, la plus simple, a permis quelques **applications** :

L'attraction de fines particules électrisées par un corps porté à un potentiel opposé. Ce fut d'abord le filtrage électrostatique des fumées, (zp) mis au point par Lodge en 1884, toujours utilisé aujourd'hui ; puis en 1930 la xérographie exploitant simultanément l'attraction électrostatique de particules d'encre chargées et la propriété photoélectrique du sélénium découverte en 1873.

Plus récemment (1950), cette attraction des fines particules électrisées a permis le développement de la peinture des automobiles.

Il faut citer aussi, le générateur à très haute tension Van de Graaff, accélérateur de particules, utilisé au début de la recherche nucléaire. Il reprenait le principe de la machine de Sigaud de La Fond (1785), où les charges sont transportées sur un ruban sans fin (zq) (16).

On doit surtout à l'électrostatique la découverte du condensateur, l'un des trois éléments des futurs circuits électriques, avec la résistance et l'inductance. Bien sûr, sans en bien comprendre le fonctionnement. De même, Volta conçut l'électromètre-condensateur, pour une simple raison pratique.



zq - Machine de Sigaud de La Fond

Cet appareil et son utilisation se révélera, par hasard, être un amplificateur de tension, absolument essentiel dans la l'invention de la pile.

Aucune autre application de l'électrostatique n'était envisageable dans les deux grands domaines où l'électricité dynamique va donner une formidable impulsion à la révolution industrielle : comme vecteur d'information, puis vecteur d'énergie.

Ainsi le monde n'aurait pratiquement guère changé avec la seule découverte de l'électrostatique, si l'invention totalement improbable de la pile, premier générateur d'électricité dynamique, n'était survenue à la fin du XVIII^e, pour ouvrir des perspectives inconcevables à l'électricité.

L'électrostatique était une préface, la préhistoire de l'électricité.

Compléments

1 - A. DE URBANITZKY, · La Nature, 1886/2 p.415 - La lumière électrique, *histoire chrono-logique* 1891/2 p.58

2 - **Thalès** est, après Pythagore, l'auteur d'un théorème familier aux lycéens. C'est au cours d'un voyage d'étude en Égypte qu'il s'est posé, raconte Plutarque, la question de la hauteur de la grande pyramide. En observant l'ombre portée de la pyramide en fin de journée, comparée avec celle de son bâton vertical, il en conclut qu'il y avait proportionnalité entre les ombres portées et les hauteurs des deux objets. Mesurant trois de ces dimensions, la quatrième s'en déduisait

3 - La disparition à une température élevée du magnétisme des ferromagnétiques, fer, nickel, cobalt par chauffage est dénommé à tort **point de Curie**, depuis que Pierre Curie l'a signalé en 1892. Claude Mathias Pouillet l'avait dénommé dans son Traité de Physique de 1832 (réédité 8 fois), *la limite magnétique*. Indication reprise dans les traités de physique de la fin du siècle, ceux de Jamin, de Drion. Les chinois observateurs avaient remarqué que si le refroidissement d'une tige d'acier se faisait en l'alignant sur l'axe nord-sud, la tige conservait un peu du magnétisme terrestre.

4 - La **Royal Society** était à l'époque l'Académie la plus importante, créée par Charles II en 1662. Au XVII^e, les princes s'intéressaient à la science et créaient leurs académies : Louis XIV, l'Académie des sciences en 1666, en Toscane, Ferdinand II, l'*Academia del cimento* en 1667. De même en Allemagne dans les universités des différents royaumes.

5 - Ce n'est pas la chute d'une pomme sur sa tête qui a révélé à Newton **la gravitation**, mais la déviation de la trajectoire d'une comète, étudiée en 1682 par Halley, lors de son passage près du soleil. Elle devint la célèbre comète de Halley, qui revient environ tous les 76 ans. Sa dernière visite date de 1986, la prochaine vers 2061.

6 - La deuxième **force fondamentale** sera la force électromagnétique, comprise progressivement par Coulomb, Ampère, Faraday et Maxwell avec l'aide des mathématiciens, Laplace et Poisson

Les deux autres forces ont été découvertes au début du XX^e siècle : La force nucléaire forte qui maintient la cohésion des protons positifs dans le noyau, malgré leur répulsion électrostatique, la force nucléaire faible est celle qui, au contraire, provoque la rupture des noyaux radioactifs.

7 - Le terme **électrostatique** n'existait pas à l'époque, on ne parlait que d'*électricité*. Il a été introduit par Ampère en 1920. Son emploi est la contraction d'*électricité statique* ou *au repos*. Il a été adopté dès le début dans ce livre pour éviter toute confusion avec l'électricité d'aujourd'hui, presque exclusivement dynamique, ou en mouvement.

Malgré une base commune, l'électron, découvert seulement en 1897, l'électrostatique concerne uniquement les phénomènes liés à l'électron au repos ou son absence ; alors que les très nombreux phénomènes résultant du déplacement des électrons dans et hors de la matière sont le domaine de l'électricité (dynamique) qui nous est familière.

8- Machines électriques, plutôt électrostatiques. Elles sont nombreuses dans notre environnement, dès que l'on frotte avec un isolant un autre isolant, en particulier certaines matières plastiques. Bien connu était l'étincelle que l'on obtenait parfois en touchant la poignée d'une voiture qui venait de rouler vite par temps sec. La carrosserie s'était chargée avec le frottement de l'air chaud. Pour y remédier, une petite métallique souple, fixée sous le châssis, le déchargeait en frottant sur la route, à la masse. Le phénomène ne se produit plus, les pneus actuels contiennent probablement du graphite conducteur ?

9 - D'après S. DUCLAU *Électricité statique*, ed. Ardant, Limoges 1882. Domage que Marco Polo n'ait pas rapporté un recueil de toutes les **inventions chinoises**, laborieusement retrouvées en Occident !

10 - Pour mieux comprendre **la foudre** : voir l'URL : <http://dspt.club.fr/foudre.htm> de Pierre Dessapt, site de bonne vulgarisation, consacré principalement à l'histoire de la radio.

Le mystère des **boules de feu** : J.B.MITCHELL et al. *nanoparticles in ball-lightning-like fireballs*, Phys. Rev. Let 100 (2008)

11 - Sur la gravure du **livre de Nollet** figure aussi à droite un récipient plein d'eau qui s'écoule par des petits trous. Lorsque le système est mis sous tension, les gouttelettes sortent en véritable jet et s'illuminent même de leurs. Le brave abbé s'est cru obligé par sa fonction, de baptiser ce système le « goupillon électrique ». Plusieurs livres de Nollet sont accessibles sur URL : cnum.cnam.fr

12 - **Aepinus**, pseudonyme de Franz Ulrich Hoeck (1724 - 1802), physicien et mathématicien prussien, établi à St Petersburg. Il publia ses travaux en 1759 : « *Tentamen theoriae electricitatis et magnetismi* ».

13 - Coulomb vérifia toutes ses mesures en transposant à sa balance la **méthode des petites oscillations**, adaptée aux oscillations d'un pendule. Un petit film (6 min) intéressant expliquant sa balance est accessible sur ampere.cnrs.fr, parcours historique, video

14 - Collection des mémoires relatifs à la physique - CH. A. COULOMB, Gauthier 1884, est accessible sur URL : cnum.cnam.fr

15 - Plusieurs mémoires de Sigaud de Lafond sont accessibles sur l'URL cité.

16 - On considère souvent les scientifiques comme des gens sérieux, étrangers à la plaisanterie. C'est pourtant à Laplace que l'on doit cette profonde réflexion, « petit poisson deviendra grand, pourvu que Dieu lui prête vie. », en se moquant de la petite taille de son élève Poisson.



Danse des pantin

Les découvertes fondamentales



« Il y a une chose plus importante que les plus belles découvertes, c'est la connaissance de la méthode par laquelle on les fait. »

Leibniz

Les inventions, applications de l'électricité, ont reposé sur quatre premières découvertes, survenues au début du XIX^e siècle. Elles sont fondamentales, ayant ouvert les principales pistes de développement à la base du système électrique, probablement parachevé aujourd'hui

1800 – L'électricité dynamique, le courant électrique permanent, par l'invention de la pile Galvani et Volta

1800 – L'électrochimie, le courant décompose les corps composés, par l'électrolyse.

Carlisle et Nicholson

1820 – L'électromagnétisme, le courant crée le magnétisme.

Oersted et Ampère.

1831 – L'induction, un courant est créé par la variation de magnétisme.

Arago et Faraday

Ces premières découvertes, vont ouvrir la voie aux inventions, sources d'une cascade d'applications, qui feront du XIX^e *le siècle de l'électricité*.

Francis Bacon, père de la science expérimentale, résumait la démarche inventive à l'alternance : **observation, raisonnement, expérience**. Ces trois étapes étant renouvelées jusqu'à confirmation d'un résultat, pas nécessairement par le même homme.

Ainsi pour les quatre découvertes citées, deux noms sont associés : le premier est celui du découvreur d'un phénomène inconnu et inexplicable avec les connaissances du moment ; le second est celui de l'homme qui a réussi à en donner une explication satisfaisante par le raisonnement et l'expérience, en bousculant souvent les idées acquises. À chaque fois, le phénomène laborieusement compris et expliqué est devenu source de nouveaux développements, tant sur le plan théorique que celui des applications.

Des deux intervenants lequel serait le plus important ? Celui qui découvre le phénomène, poseur de question sans réponse, ou bien celui qui cherche à comprendre et répond à la question ? Chacun a constitué un maillon complémentaire, mais essentiel, de la découverte.

Il est à remarquer que ces quatre premières découvertes de l'électricité ont suivi le même processus en deux temps, mais séparés par une durée très variable. Quelques jours pour l'électro-chimie, quelques semaines avec la rapide intuition d'Ampère ; Faraday après quelques années de recherches bien orientées ; mais plus d'une décennie pour Volta, lequel avec un résultat assez fréquent, le chercheur ne trouve pas ce qu'il cherche, mais autre chose, parfois plus intéressant.

À la fin du XIX^e siècle seulement, alors qu'on maîtrisait déjà bien les techniques électriques, deux autres découvertes révéleront **deux natures de l'électricité**, ignorées jusque-là :

1888 – La découverte des **ondes électromagnétiques** sera le résultat d'un processus analogue, mais en trois temps : Faraday avait posé la question – comment se transmettait l'effet d'induction à distance ? Maxwell démontre en 1864, l'existence d'ondes inconnues. Elles propagent le champ électromagnétique dans l'éther, et la lumière visible n'est qu'un cas particulier d'ondes.

Elles sont découvertes expérimentalement 24 ans plus tard, par Lodge, résultat d'une recherche ciblée, et surtout par Hertz, au cours d'autres expériences.

1897 – La charge électrique que l'on supposait exister depuis trois siècles, mais dont on ne savait presque rien, est découverte par J. J. Thomson. La propagation relativement libre de l'**électron** dans le vide va donner naissance aux lampes ou tubes sous vide, premiers outils indispensables à l'électronique pour le traitement des ondes dans les émetteurs et récepteurs, TSF, Radio, TV, radar.

Mais surtout, l'électron va révéler la constitution de l'atome de toute matière.

1948 – Pour clore la liste actuelle des découvertes fondamentales en l'électricité, évoquons la septième grande découverte, au XXe siècle, l'**effet transistor** dans les **semi-conducteurs** par le trio américain John Bardeen, Walter Brattain, William Shockley, découvreurs-inventeurs aux Bell Labs.

L'électronique à l'état solide, l'informatique, l'internet, le téléphone portable, le GPS, etc... en sont des applications bien connues. On était loin d'envisager ce déferlement, si le numérique, invention de père inconnu, n'avait décuplé les possibilités du transistor et des semi-conducteurs.

L'avancement de la science électrique a nécessité bien d'autres découvertes, mais plus secondaires par leurs conséquences.

Découverte, invention, innovation

La **découverte** est une nouvelle connaissance sur la constitution ou le fonctionnement d'une parcelle de l'Univers qui nous entoure, l'immatériel, la matière inerte ou vivante. Elle résulte d'un travail de **recherche** dite **fondamentale**. Elle accroît les **connaissances scientifiques**, et se déroule parfois en deux ou plusieurs étapes, souvent par des hommes différents.

De nos jours, une découverte, comme un principe, n'est pas brevetable, elle appartient à l'humanité, toute personne peut alors exploiter cette nouvelle connaissance, généralement publiée, pour réaliser ensuite des inventions.

L'**invention** est la réalisation matérielle d'une machine ou méthode capable de fonctionner, d'un appareil réellement nouveau ou resté inconnu, ou encore d'une fonction nouvelle regroupant des machines existantes. Elle s'appuie sur des **techniques**. Généralement brevetée, avec des règles différentes suivant les nations, elle résulte d'un travail de **recherche appliquée**, exploitant souvent les apports de la recherche fondamentale. Comme son objectif est la création puis le développement d'un nouveau produit commercialisable, on la qualifie aussi de **recherche-développement, R et D**.

L'inventeur s'arrête assez souvent au brevet, ou à la première maquette. Le chemin restant est souvent long pour arriver au produit industriel, le travail du développeur. Fonction essentielle pouvant être assurée par l'inventeur lui-même s'il en a la capacité, sinon par un développeur.

– La **découverte** par la recherche fondamentale, c'est **comprendre l'Univers**.

– L'**invention**, puis le développement, c'est **exploiter la Nature** pour nos besoins matériels.

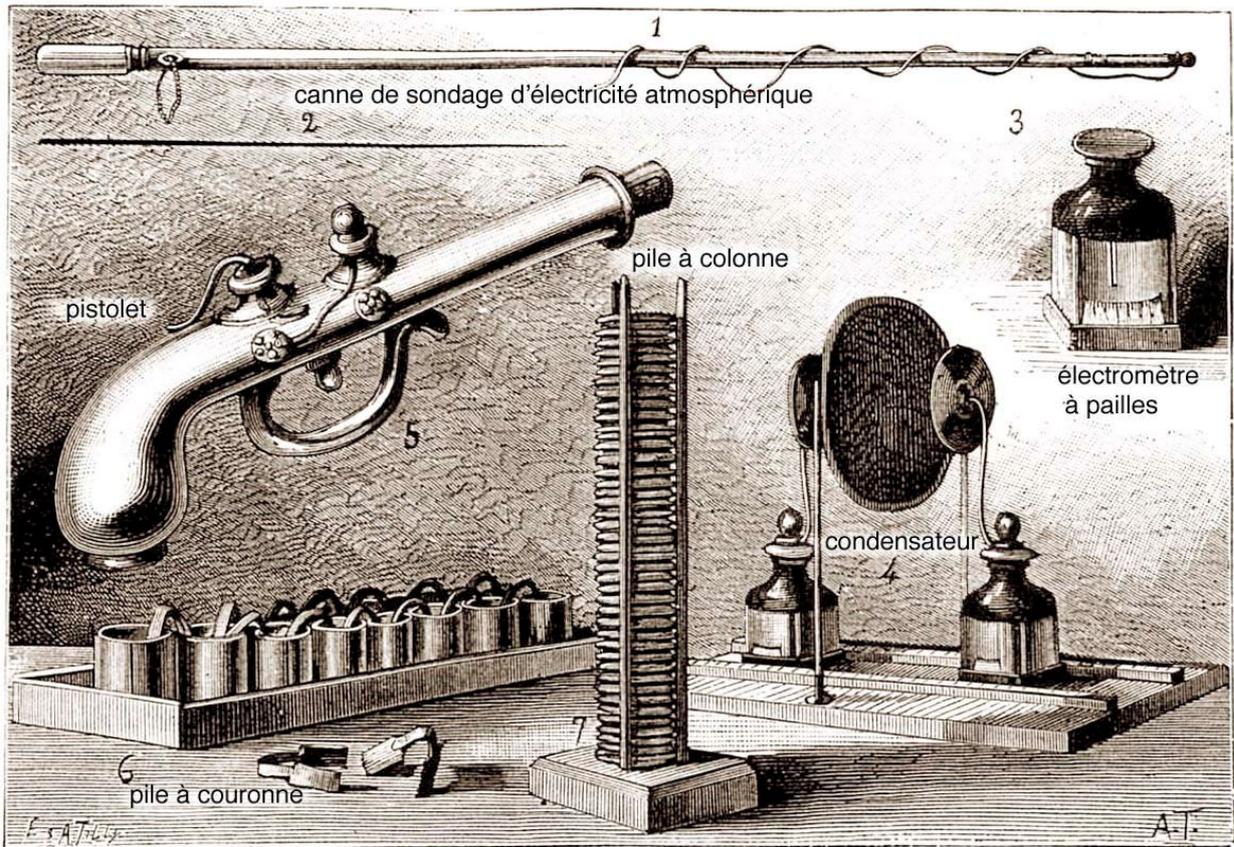
Il arrive que découverte et invention soient faites simultanément, l'une ayant entraîné l'autre :

– En cherchant autre chose, **Volta** invente la pile et découvre qu'elle génère un fluide permanent inconnu, l'électricité.

– **Le trio des Bell Labs** découvrent une propriété inconnue des semi-conducteurs, l'effet transistor. Ils inventent ainsi un nouveau composant électrique, le transistor.

Cette simultanéité, découverte et invention, semble être aussi une caractéristique des recherches actuelles en *nanotechnologies*. D'où leur appellation parfois de *technoscience*.

L'**innovation**, caractérisant ce qui est nouveau, peut qualifier l'invention à fortiori nouvelle, mais aussi la nouveauté qui n'est souvent qu'un perfectionnement, ou la modification de l'aspect physique, ou une nouvelle utilisation d'inventions. L'innovation n'est que fugitive



Appareils de Volta



3 - L'électricité dynamique – l'électrochimie

L'invention de la pile – L'électrochimie

Galvani et Volta

Alors que la plupart des découvertes s'appuient sur l'état des connaissances antérieures, aucun élément d'électrostatique ne laissait présager l'existence :

d'une force électro-motrice, capable de générer un courant électrique permanent.

L'invention de la pile, origine de la découverte, n'était pas dans l'air du temps, ni une évolution d'un appareil connu, une invention presque *ex nihilo* :

- Le découvreur- inventeur, Volta, cherchait tout autre chose.
- Elle résultait d'une étonnante succession de hasards,
- d'années de controverses entre les partisans de Galvani et Volta,
- d'observations sagaces, d'interprétations erronées et d'intuitions géniales.
- sur un sujet ésotérique, l'agitation des pattes de grenouilles écorchées, puis touchées par deux métaux différents.
- Le comble fut que Volta se trompait sur le principe de son fonctionnement, et pourtant elle marchait !
... produisant un fluide invisible, inimaginable.

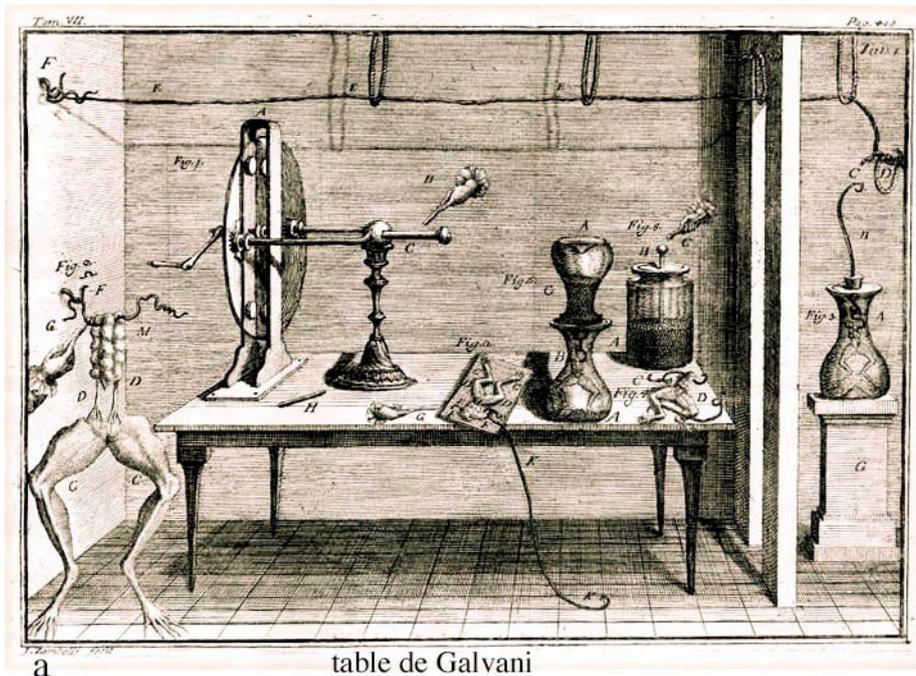
L'histoire s'est déroulée principalement dans les États au Nord de l'Italie actuelle (1).

1780 - La découverte du couple Galvani

Aloysius, Luigi **Galvani** était professeur de médecine et d'anatomie à l'université de Bologne, l'une des plus anciennes et célèbres universités d'Europe. L'un de ses sujets d'étude était l'irritabilité du système nerveux des animaux, en particulier la relation qu'il pouvait avoir avec le fluide électrique, généré par les curieuses machines électrostatiques et celui des poissons électriques. Une étude faite par Walsh sur ces poissons posait la question : d'où venait cette électricité. L'animal le mieux adapté à ces expériences était la grenouille. En la dépeçant, on ne conservait que les deux pattes arrière et le bas de la colonne vertébrale, ce qui permettait de séparer les deux nerfs cruraux commandant les muscles des cuisses et d'expérimenter quelques heures. Ensuite les grenouilles finissaient dans un bouillon aux vertus curatives.

Ce jour-là, en 1780, plusieurs personnes étaient occupées à divers travaux sur les tables du laboratoire (a). Galvani raconte dans son mémoire (1), traduit du latin par Becquerel :

« Je disséquais une grenouille et la préparais comme l'indique la figure et, me proposant de faire tout autre chose, je la plaçais sur une table sur laquelle se trouvait une machine électrique ; elle n'était séparée du conducteur que par un petit intervalle.

a
table de Galvani

Une des personnes qui m'aidaient ayant approché légèrement, par hasard, la pointe d'un scalpel des nerfs cruraux de cette grenouille, aussitôt tous ses muscles se contractèrent de telle sorte qu'on aurait dit qu'ils étaient agités par les plus fortes convulsions.

Une autre personne qui faisait avec moi des expériences sur l'électricité remarqua que ce phénomène avait lieu seulement lorsqu'on tirait une étincelle du conducteur de la machine.

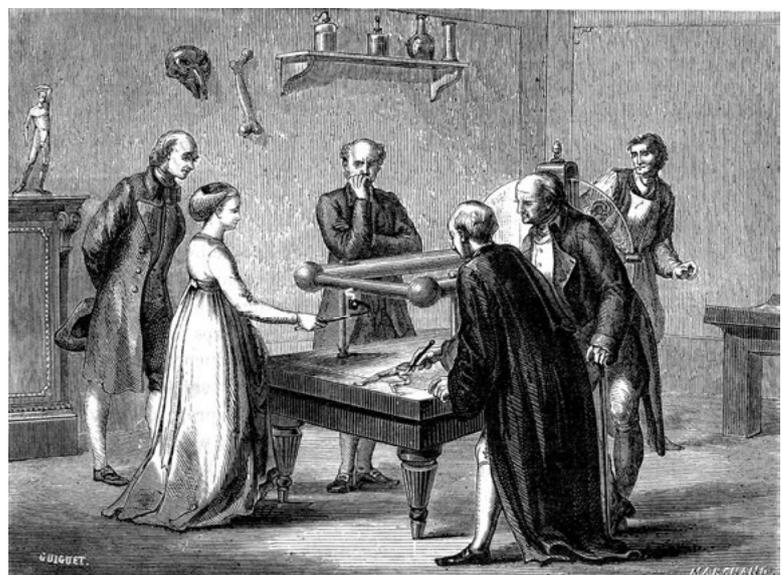
Tandis que j'étais

occupé d'autre chose, cette personne, étonnée de ce fait vint aussitôt m'avertir. Brûlant du désir de répéter l'expérience, je voulus aussitôt mettre au jour la cause inconnue de ce phénomène. En conséquence, je touchai moi-même avec la pointe du scalpel l'un et l'autre des nerfs cruraux, tandis qu'on tirait une étincelle : le phénomène se présenta de la même manière ; je vis de fortes contractions dans les muscles des membres, comme si l'animal avait été pris du tétanos, et cela au moment même où on tirait des étincelles. »

D'après P. Sue et C. Alibert, « l'autre » personne qui prévint Galvani était son épouse Lucia, comme sur la gravure de Figuier (b), représentant la scène. C'est l'une des très rares interventions d'une femme dans la science au cours de ce siècle. Sans cette curiosité expérimentale d'une femme, acquise en travaillant avec son époux, l'acte I de la découverte de l'électricité dynamique n'aurait pas été joué... avant combien d'années ? Premier hasard. Il est dommage qu'Arago, des années plus tard ait ramené le rôle de Lucia Galvani à la préparation d'un bouillon de grenouilles pour son rhume.

La place des femmes était alors à la cuisine, pas dans un laboratoire scientifique, domaine exclusivement réservé aux hommes pendant encore plus d'un siècle. À la rigueur, on acceptera la femme, mais dans un rôle magique, la fée Électricité, les premières divinités de l'humanité ayant été des déesses.

Pour tous les auteurs qui ont raconté cette expérience fondatrice, il s'agissait d'un phénomène connu à l'époque, le *choc en retour* se produisant sur les personnes ou animaux, lorsque la foudre tombait même très loin d'eux. Or l'étincelle fugitive de décharge de la machine électrique avait été assimilée à un éclair en miniature. L'explication était cohérente avec les connaissances de l'époque.

b
contraction de la grenouille de Galvani

Pour nous ce choc en retour résulte de la décharge subite du nuage orageux à la terre, entraînant l'annulation brutale du fort champ électrique entre les deux armatures du condensateur géant constitué par le nuage et la terre ; champ atteignant 20 000 volts par mètre au niveau du sol.

Ce n'était absolument pas le cas sur la table de Galvani, au voisinage d'une machine électrique, mais on ne pouvait le savoir. Cependant Galvani, en expérimentateur consciencieux, recommença l'expérience en faisant varier diverses conditions ; en particulier, lorsqu'il remplaçait le scalpel en métal par une tige isolante en bois, rien ne se produisait, ce qui confirmait que ce n'était pas le choc en retour. Étrange !

En réalité, le couple **Galvani précédait Hertz d'un siècle**. Le scalpel et la personne qui le tenait constituaient ensemble une antenne de Popov, détectant le bref train d'ondes électromagnétiques émises par l'étincelle de la machine, qu'Hertz remplacerait par une bobine d'induction. Le très faible courant à haute fréquence que captait Galvani suffisait à exciter le nerf du muscle de la grenouille.

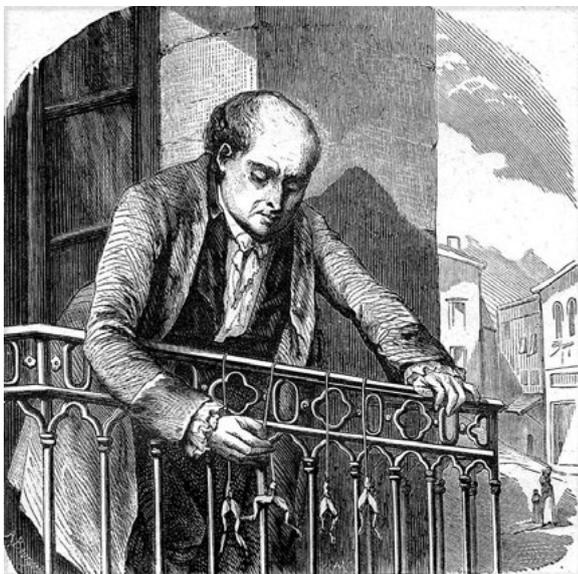
La confirmation du phénomène était sa disparition en remplaçant le scalpel par du bois.

L'hypothèse du choc en retour ne lui semblant pas satisfaisante, Galvani présentait une autre cause, l'électricité interne générée par l'animal, et il entreprit de multiples expériences pendant six ans. En particulier, pour vérifier que l'effet de la foudre devait être plus fort que celui de la machine électrique ; un jour orageux il installa sur le toit une tige de fer reliée à un long fil descendant dans une pièce où il suspendit la grenouille écorchée, dont une patte touchait la table reliée à la terre. À chaque éclair, même lointain, les cuisses s'agitaient fortement. Il ne pouvait pas comprendre qu'il avait suspendu la grenouille à une bonne antenne, réceptrice des ondes émises par chaque éclair, ondes que nous captions dans nos anciennes radios (à modulation d'amplitude), les jours d'orage, sous forme de crachements parasites.

Ce fut une non-découverte bien prématurée ; pour nous, la grenouille se révélait être un détecteur d'ondes ultrasensible, ancêtre du résonateur de Hertz, puis du cohéreur de Branly, mais un siècle trop tôt (2).

1786 - L'électricité animale

Galvani, obstiné, revenait souvent sur ce problème, il avait l'intuition du chercheur que cela cachait quelque chose d'important, peut-être que la grenouille générait de l'électricité comme certains poissons. À tout hasard, peut-être la dernière expérience avant d'abandon-ner, il teste la réaction possible des grenouilles à la faible électricité atmosphérique régnant par beau temps, en les suspendant par un crochet sur son balcon. Il renouvelle plusieurs jours l'expérience et monte fréquemment les observer, mais rien ne se produisait.



C Galvani suspend les grenouilles au balcon

« ...Enfin fatigué de cette vaine attente, je me mis à presser, à frotter contre les barreaux de fer, les crochets de cuivre qui traversaient la moelle épinière des grenouilles, afin de voir si par ce genre d'artifice, les contractions musculaires seraient excitées, et si elles se modifieraient en quelque façon, suivant les états électriques de l'atmosphère.

J'ai souvent observé, à la vérité, des contractions, mais sans que l'état électrique de l'atmosphère y fut pour rien ».

Galvani vient de découvrir un nouveau phénomène totalement différent du précédent, mais produisant le même effet :

Lorsqu'il frotte les crochets sur la balustrade, les muscles se contractent parce qu'ils touchent fugitivement le fer du balcon. **Un circuit fermé s'établit entre trois corps par trois contacts** : fer du balcon sur le cuivre du crochet, cuivre sur le nerf lié au muscle, muscle sur le fer.

Méticuleux, il recommence l'expérience au laboratoire avec du fer poli propre, les contractions se reproduisent, une évidence s'impose, le fluide ne résulte plus d'une influence extérieure, il ne peut prendre naissance que dans la grenouille elle-même. Ni l'électricité des machines, ni celle de l'atmosphère n'y sont pour rien.

Galvani pense toucher au but, il révèle une électricité qui prendrait naissance dans le corps de la grenouille qu'il dénomme *l'électricité animale*. En scientifique méthodique et prudent, il sait bien, et l'a d'ailleurs écrit, que le chercheur a toujours tendance à voir ce qu'il a envie de voir. Il essaie une quantité de solides, liquides et même des parties de l'animal pour constituer cet *arc excitateur* et conclut que le corps des animaux est une bouteille de Leyde organique de très faible puissance.

Il généralise en écrivant que tous les animaux jouissent d'une électricité inhérente à leur *économie*, sécrétée par le cerveau puis conduite dans tout le corps par les nerfs, dont la substance intérieure est douée d'une vertu conductrice pour cette électricité. Il touchait peut-être le secret de la vie.

L'avenir, en l'occurrence les travaux de Matteucci, et surtout du physiologiste allemand du Bois Reymond, lui donneront en partie raison, l'électricité joue un rôle dans ce qu'on appelait l'*économie animale*, mais pas exactement celui qu'il supposait.

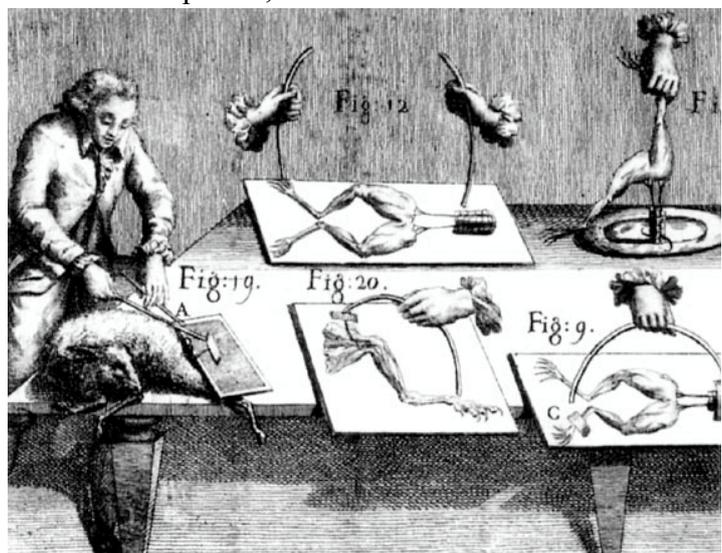
Il publie en 1791 les résultats de ses onze ans de recherches dans les mémoires de l'Académie de Bologne : « *De viribus electricitatis in motu musculari commentarius* » (3).

1791- La controverse

Les phénomènes décrits et les déductions qu'en tirait Galvani firent sensation dans le petit monde, restreint à l'époque, des physiologistes et celui des physiciens d'Europe, à l'exception des savants français pris dans les remous violents de leur révolution. L'un des leurs, Lavoisier, va d'ailleurs y laisser sa tête (4). Partout on répète et l'on vérifie les expériences de Galvani en changeant successivement l'un des paramètres ; on s'aperçut que l'effet était plus ou moins fort selon le couple de métal utilisé pour les *arcs*, les tiges de connexion (e). Le couple cuivre ou argent associé au zinc donnait les plus fortes manifestations. On essaye sur différents animaux, même sur l'homme.

En 1793, un célèbre chirurgien français, Dominique Larrey, venait d'amputer un accidenté de sa jambe, il en isole le *nerf poplité*, l'entoure d'une feuille de plomb, dénude les muscles et touche à la fois avec une lame d'argent l'un des muscles et le plomb, la jambe entière et même le pied font des mouvements convulsifs intenses qui effraient l'assistance.

Aldini, neveu de Galvani, crée à Bologne une société de physiologie pour défendre les idées de son oncle. En effet, après un accueil enthousiaste, des critiques et même des oppositions se manifestent, surtout chez les physiciens, Pfaff, professeur à Stuttgart, Volta et Brugnatelli, professeurs à Pavie en Lombardie, expliquent que le fluide ne prend pas naissance dans l'animal mais dans le contact des deux métaux différents qui font la jonction entre le nerf et le muscle.



e Expériences sur l'électricité animale

Le croquis (f) schématise le débat. Pour les *galvanistes*, le fluide prend naissance dans le muscle M et les arcs ne sont que de simples conducteurs. Pour les *voltaïstes*, le fluide apparaît au contact A des deux conducteurs métalliques qui le communique à l'animal par les contacts B et C.

Il restait une troisième possibilité, que la génération du fluide se produise en B ou C.

Cette **troisième voie chimique** était la bonne, mais on ne la découvrit qu'après l'invention de la pile, ou plutôt on le redécouvrit.

Entre les deux camps des physiologistes et des physiciens s'interposa un moment celui des chimistes. Fabroni, suivi par Valli, communiqua ses recherches à l'Académie de Florence en 1792. Sa thèse reposait sur les effets d'oxydation de métaux entre eux et en présence d'humidité.

Par exemple, les clous en fer fixant la protection des coques de navire en cuivre étaient très oxydés en présence d'eau de mer. Ce troisième regard n'intéressa pas grand monde. On l'oublia bien à tort.

Volta, trop occupé à suivre son intuition, n'a pas su écouter celle des autres. Déjà à cette époque, le cloisonnement entre disciplines, physiciens, biologistes, chimistes, démontrait la relative incapacité à jeter des passerelles fructueuses entre les différents domaines scientifiques et techniques. Mal encore plus dommageable actuellement avec le compartimentage inévitable des disciplines scientifiques.

Comment cette étrange idée de la production d'électricité au contact de deux métaux est-elle donc venue à Volta ? Plusieurs possibilités :

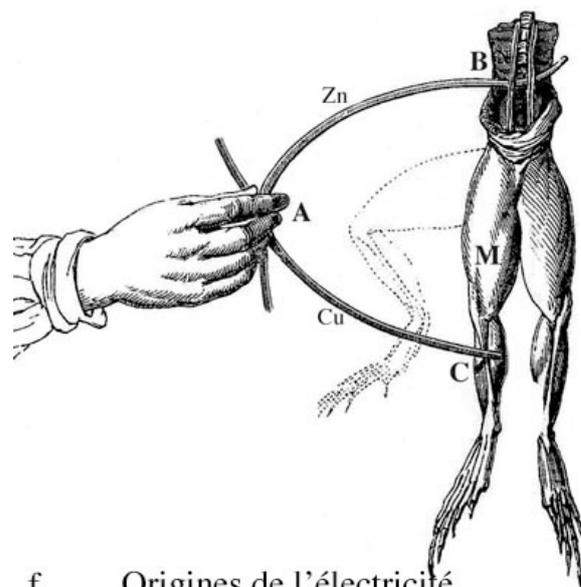
- La plus généralement invoquée est l'expérience de Sultzer, philosophe suisse qui avait communiqué en 1761 à l'Académie de Berlin un mémoire, sans rapport avec la physique, *Théorie du plaisir*. Il proposait une expérience amusante : en maintenant sur la langue une pièce de plomb et en dessous une pièce d'argent, si l'on met ces deux pièces en contact à l'extérieur, on perçoit la saveur agréable du vitriol de fer et une lueur dans les yeux.

- Une autre plus plausible est le fait rapporté par Abraham Bennet dans son mémoire de 1789, *New Experiments in Electricity*, que de nombreux métaux prennent une électricité opposée quand ils sont séparés d'un autre corps électrisé (5). Théorie peu connue, rarement évoquée.

- Ou tout simplement, Volta imagina intuitivement ce rôle du contact intermétallique.

Dans un premier temps, on pouvait croire Galvani vainqueur du débat. Il réussit à obtenir des contractions, certes faibles, en utilisant un arc d'un seul métal, et qui plus est, sans aucun conducteur extérieur, en touchant le muscle de la grenouille avec son propre nerf. Longues expériences consignées en 1794 dans « *dell'uso e dell'attivit a dell'arco conduttore nelle contrazioni...* ». Volta répliquait, en démontrant un peu spécieusement, que cela confirmait sa théorie de l'hétérogénéité des contacts, et affirmait sa position dans le Journal de Leipzig, puis dans le *Giornale physico medicale de Brugnatelli* :

« Il n'y a pas longtemps, à la vérité, que par des expériences indubitables, j'ai démontré que les métaux, et même les meilleurs charbons de bois, étaient non seulement les meilleurs conducteurs de l'électricité, mais même des excitants par le moyen du simple contact ... C'est par leur propre vertu qu'ils poussent et forcent le fluide électrique à entrer dans la superficie qu'ils touchent, où à en sortir, que les métaux excitent cette faible électricité, que l'on ne peut en aucune manière découvrir avec l'électromètre ordinaire... pourvu que les métaux soient convenablement appliqués à l'eau ou à des corps imbus d'humour, comme les nerfs et muscles des animaux... »



f Origines de l'électricité

Dans ce texte apparaît l'ébauche d'une définition de la *force électromotrice*, concept qu'il précisera en 1800, «... qui met en mouvement le fluide électrique ». De même les nécessités d'un électromètre exceptionnel et surtout celle d'un *contact humide*. Cette dernière précision, autre clef de sa découverte, rendra plausible son explication du contact intermétallique comme générateur d'électricité.

Volta avait un atout maître, ayant à sa disposition cet **électromètre-condensateur**, qu'il avait inventé par hasard, sans but précis, quelques années plus tôt. L'appareil était ce que nous appelons un fort amplificateur de tension, il pouvait apprécier des tensions très faibles, de l'ordre du volt, précisément celle de la future pile, troisième hasard étonnant sans lequel la découverte de la pile n'aurait pas été possible. De plus, cela lui évitait d'utiliser la grenouille comme électroscope, contrainte très gênante pour Galvani dont la grenouille servait à la fois de générateur d'électricité et de détecteur, d'où sa confusion entre cause et effet.

Il reçoit en 1794 la médaille Copley de la Royal Society pour sa théorie du contact intermétallique et devient membre de cette Académie scientifique, considérée à l'époque comme la sommité mondiale.

Intermède guerrier (1796-1800)

La controverse s'enlisait, d'autant plus que la révolution française exportait ses troubles à l'étranger. En 1796, le jeune et fougueux général Bonaparte chasse l'Autriche de Lombardie, Volta fait partie d'une délégation venue solliciter la protection de l'envahisseur. Pavie est pillée par la soldatesque, l'université fermée, mais les maisons de Volta et du chimiste Spallanzani sont protégées par des officiers, sur ordre du général.

À Bologne, Galvani refuse de prêter serment à la nouvelle République Cisalpine, il est destitué et entreprend en 1797 en voyage au bord de l'Adriatique, pour étudier la torpille électrique.

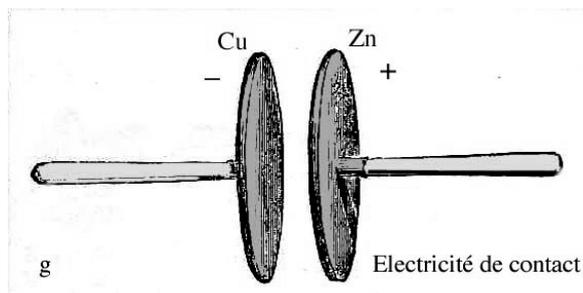
À son retour, sa femme Lucia décède, désespéré il est sans ressources et meurt dans la quasi-misère en 1798, sa chaire de professeur venant juste de lui être rendue. Bonaparte parti en Égypte, l'Autriche revient après Cassano en 1799, l'Université de Pavie est fermée en raison de son attitude de *collaboration* avec les Français, mais Volta n'est pas inquiété. Puis c'est Marengo en mai 1800 et le retour des Français, l'université est ouverte à nouveau, Volta prête serment à la République Cisalpine.

Lente maturation de l'invention (1796 - 1799)

Les choses auraient bien pu s'arrêter là, et l'affaire des grenouilles serait restée, dans le petit monde scientifique, l'une des multiples questions sans explication. C'est là que la ténacité de Volta, qualité des découvreurs, allait le conduire à réaliser un bricolage expérimental aux propriétés surprenantes, dépassant complètement l'objectif de sa recherche, l'agitation des pattes de grenouilles quand on met le nerf en relation avec le muscle par des conducteurs métalliques.

Au milieu des bruits de bottes françaises, ce fut donc pour Volta un long cheminement de réflexions et d'expériences que l'on peut résumer en plusieurs étapes (6) : Pour vérifier d'abord que le contact zinc-cuivre générait de l'électricité comme il le suppose, il réalise un disque de chacun de ces métaux avec un manche en verre (g). En amenant en contact brièvement les deux disques, chacun doit se charger d'une polarité contraire. Après ce premier contact, celui en cuivre est mis en contact avec le plateau de l'électroscope-condensateur pour lui transmettre sa charge. Pensant qu'elle est trop faible pour faire bouger les pailles de l'électroscope, Volta répète l'opération une douzaine de fois pour accumuler plus d'électricité à chaque manœuvre.

- 1) Il soulève le plateau du condensateur, diminuant progressivement la capacité, donc amplifiant la tension, suivant la formule inconnue à l'époque : $Q = C.V$, la quantité d'électricité Q restant constante. Les pailles dévient, témoignant d'une charge négative.



Le même processus est repris avec le disque de zinc qui apporte symétriquement une charge positive (I-2).

La démonstration est concluante, le contact cuivre-zinc crée ce que Volta dénommera plus tard une *force électromotrice*, pour nous un potentiel, de l'ordre d'un volt.

Les hasards ou réflexions qui l'ont conduit à cette expérience sont vraiment surprenantes. Mais Volta ne peut pas comprendre que cette *force*, un potentiel, ne peut générer le moindre fluide ; aucune énergie ne peut être créée par un simple contact zinc-cuivre, sans la disparition d'une autre énergie, provenant de quelque part, d'où ? Ce serait contraire à l'incontournable loi de conservation de l'énergie encore inconnue. (I-6)

2) Ce premier résultat paraissant convaincant, Volta va relier en permanence les deux métaux sous forme d'un barreau constitué d'une moitié en cuivre soudé sur une autre en zinc. Il effectue 3 opérations (h) :

a) En tenant à la main le barreau par le côté zinc, il touche le plateau supérieur de l'électroscope avec le côté cuivre, le plateau inférieur avec l'autre main pour le décharger à la terre, puis il soulève le plateau supérieur, l'appareil dévie et se charge *moins*.

b) Même opération en tenant le barreau par le côté cuivre, pas de déviation.

c) Même opération qu'en b, mais il assure le contact entre le zinc et le plateau par un contact humide, pour simuler les humeurs superficielles de la grenouille.

Quoi de plus simple que de faire une boule de papier mâché avec un morceau du journal posé à côté. L'appareil dévie et se charge *plus*, cela marche d'ailleurs mieux avec du papier imbibé d'eau un peu acidulée ou salée, essayé après (8).

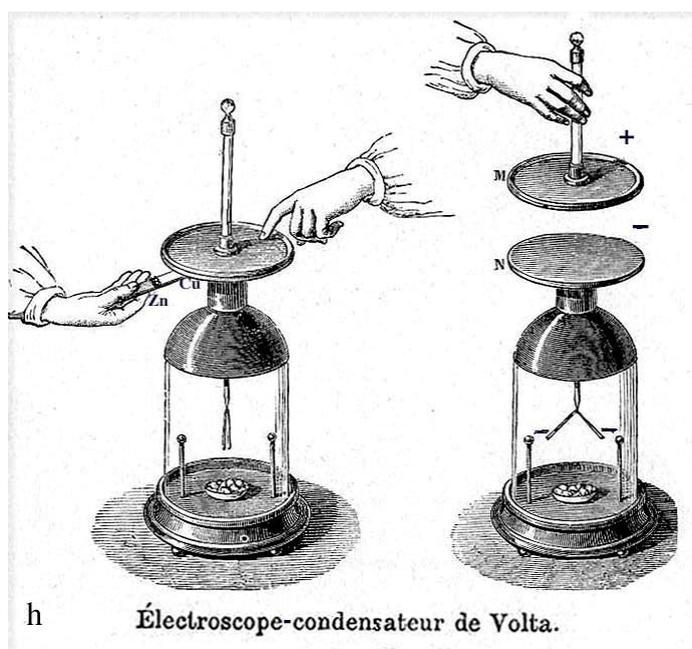
Cette **nécessité du contact humide** rend l'interprétation de Volta erronée dans les trois expériences:

En a) Pour Volta c'est la démonstration de sa thèse ; en fait il y a réaction chimique entre l'humidité du doigt et le zinc, avec génération de courant ; il signale d'ailleurs que si le doigt est mouillé d'eau acidulée la déviation est plus forte.

En b) Pour Volta c'est normal, dans une chaîne Cu-Zn-Cu les deux forces de signes contraires s'annulent. En réalité, il n'y a pas de réaction chimique du doigt avec le cuivre.

En c) Pour Volta, la force du couple du barreau s'écoule par le papier humide qui facilite la conduction, en fait il y a réaction chimique au contact zinc-papier, humidifié à la salive.

En conclusion, **Volta faisait une erreur de principe** en attribuant l'apparition de la force électromotrice au contact métallique cuivre-zinc, alors qu'en réalité c'était la réaction chimique du zinc avec son doigt humide ou le papier mâché qui la provoquait. Il compensait cette erreur par une autre,



h

Électroscope-condensateur de Volta.

en considérant que le papier humide ne serait qu'un simple conducteur passif, semblable aux suc humides des tissus de la grenouille.

Avec cette **double erreur**, cela marche, comme si la théorie du contact intermétallique s'appliquait dans son cas. Cet homme intelligent devait néanmoins avoir l'intuition d'un défaut dans son raisonnement, mais en pragmatique, cela marchait, alors on verrait plus tard pour l'explication (9).

Le physiologiste Claude Bernard déclarait : « Je trouve d'abord, je cherche ensuite pourquoi. »

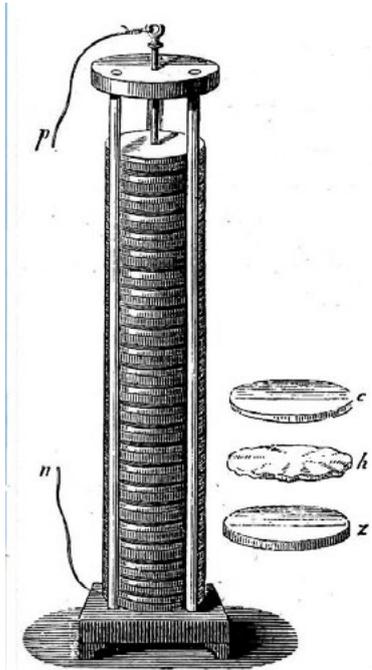
Volta avait trouvé, à d'autres la recherche du pourquoi.

Quant à la fécondité de l'erreur en science, nombre d'exemples l'ont illustré, à commencer par celui de Kepler.

1799 - La pile

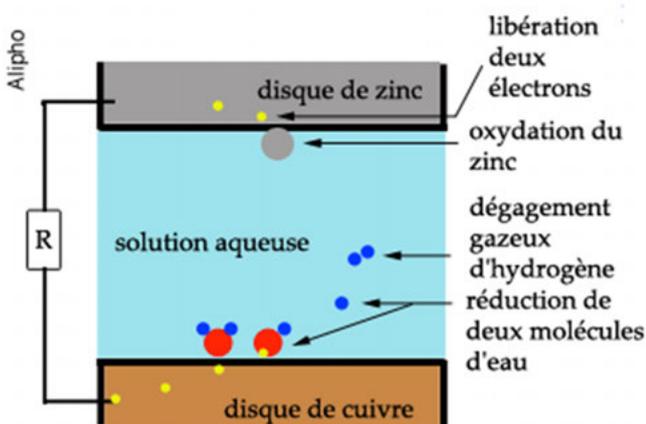
Volta avait essayé au début de multiplier l'effet d'un contact intermétallique en mettant *en cascade*, une *série* de couples zinc — cuivre—zinc—cuivre, etc., comme pour les bouteilles de Leyde. Il ne recueillait aux extrémités que la tension d'un seul couple, chacun des autres couples s'annulant mutuellement, et de plus ce potentiel était incapable de générer le moindre courant, indispensable pour électriser la grenouille. Par contre, avec l'artifice du papier humide, cela marchait. En empilant successivement des rondelles zinc—papier—cuivre—zinc—papier—cuivre, il obtenait l'effet double d'une seule triade zinc—papier—cuivre.

Alors, en remplaçant le papier salivé par un feutre humidifié un peu acide ou basique, puis en empilant une série de 10, 20,... 100 triades de rondelles maintenues par des baguettes de bois fixées sur un socle, l'effet est multiplié par 10, 20...



Volta réalise alors un appareil très simple avec trois constituants banals, qui produira quelques décennies plus tard, des effets extraordinaires :

le premier générateur de courant électrique permanent (j)



Principe de la pile

Il est basé sur une réaction chimique d'oxydo-réduction, combinaison de deux réactions qui s'enchainent.

L'oxydation d'un atome de zinc produit deux électrons qui circulent dans le circuit extérieur vers le cuivre sous l'action de la force *électro-motrice* générée par l'oxydation. Ces électrons réduisent l'eau en dihydrogène gazeux, l'oxygène allant oxyder le zinc.

Volta ignorait bien sûr l'électron, découvert un siècle plus tard et l'atome 10 ans encore après. Il raisonnait uniquement expérimentalement dans le brouillard, en se basant peut-être sur la théorie peu

connue qu'il découvrirait, le potentiel de contact de deux métaux différents, ou par intuition Pour nous, ce potentiel est la différence de l'énergie d'extraction d'un électron de deux métaux différents.

Volta explique en décembre 1799 :

« Après avoir bien vu quel degré d'électricité j'obtiens d'une seule de ces couples métalliques à l'aide du condensateur dont je me sers, je passe à montrer qu'avec deux, trois, quatre, etc. couples bien

arrangés, c'est à dire tournées toutes dans le même sens et communiquant toutes les unes avec les autres par autant de couches humides (qui sont nécessaires pour qu'il n'y ait pas d'action en sens contraire, comme je l'ai montré), on a justement le double, le triple, le quadruple de déviation de l'électromètre. Voilà donc déjà une petite **pile** construite ; elle ne donne pas encore des signes à l'électromètre sans le secours du condensateur... il faut qu'une telle pile soit composée soit composées d'environ soixante de ces couples... De cette manière, on peut avoir déjà des commotions pourvu que les métaux soient nets et propres, et surtout que les couches humides interposées ne soient pas de l'eau pure et simple, mais des solutions salées assez concentrées. »

Il est le premier étonné de ce qu'il a obtenu en cherchant tout autre chose, provoquer l'agitation des cuisses de grenouille. Il l'annonce à la plus haute sommité scientifique de l'époque, Sir Joseph Banks, président de la Société Royale de Londres, depuis Côme, sa ville natale, où il s'est retiré après la fermeture de l'université.

« Côme en Milanais, ce 20 mars 1800

J'ai le plaisir de vous communiquer, et par votre moyen à la Société Royale quelques résultats frappants auxquels je suis arrivé en poursuivant mes recherches sur l'électricité excitée par le simple contact mutuel de métaux différents... Le principal de ces résultats est la construction d'un appareil qui ressemble pour les effets (les commotions) aux bouteilles de Leyde faiblement chargées, qui agiraient cependant sans cesse... une action perpétuelle sur le fluide électrique... Oui, l'appareil qui vous étonnera sans doute, n'est qu'un assemblage de bons conducteurs de différentes espèces. Vingt, quarante, soixante pièces de cuivre ou mieux d'argent, appliquée chacune à une pièce d'étain ou beaucoup mieux de zinc et un nombre égal de couches d'eau, ou de quelque autre humeur qui soit meilleur conducteur comme l'eau salée, la lessive, ou des morceaux de carton, de peau bien imbibée de ces humeurs... une telle suite alternative, et toujours dans le même ordre de ces trois espèces de conducteurs, voilà tout ce qui constitue mon nouvel instrument... Cet appareil, semblable dans le fond à l'organe électrique naturel de la torpille, je voudrais l'appeler **organe électrique artificiel** ».

Volta insiste bien sur son erreur: "L'action qui met le fluide électrique en mouvement, ne s'exerce pas comme on l'a cru faussement, au contact de la substance humide avec le métal, ou bien il ne s'en exerce là qu'une très petite qu'on peut négliger, en comparaison avec celle qui s'exerce au contact entre des métaux différents. »

Comme la plupart des grands découvreurs, Volta n'a qu'une idée très limitée des applications de son invention, uniquement dans la médecine : « *Tous les faits que j'ai rapportés vont ouvrir un champ assez vaste de réflexions, intéressant particulièrement la médecine, Il y en aura pour occuper l'anatomiste, le physiologiste et le praticien.* »

Il considérait son *électromoteur* essentiellement comme un appareil pouvant remplacer la bouteille de Leyde pour donner des commotions. Celles-ci étaient bien moins fortes, mais duraient un temps en principe illimité, alors que la bouteille devait être rechargée chaque fois.

Heureusement que le brevet était encore presque inconnu, car Volta aurait pu breveter, non la découverte du courant électrique, mais l'invention de cet empilage de rondelles.

Volta avait découvert l'électricité dynamique, un courant permanent généré par le premier électromoteur, empilement de trois éléments simples.

Aucune invention depuis des millénaires n'aura déclenché en un siècle autant d'autres inventions capitales pour l'humanité, que cette juxtaposition tellement ordinaire de trois rondelles, cuivre, zinc et papier mouillé de salive, sel ou vinaigre.

Pourquoi personne n'y avait-il pensé plus tôt, si c'était si simple ?

La réponse est probablement dans la pile parthe, ci-après.

1800 - Découverte de l'électrochimie

À peine la lettre de Volta est-elle connue à Londres qu'un chirurgien **Anthony Carlisle** s'empresse de suivre son conseil d'étudier l'action de ce nouveau fluide voltaïque sur les animaux, et découvre lui aussi tout autre chose.

Le 30 avril 1800, Il construit une pile avec 17 pièces d'argent, autant de rondelles de zinc et de carton imbibé d'eau salée, mais devant les difficultés demanda à son ami le physicien **Nicholson**, de l'aider. Ils relient les deux extrémités de la pile aux plateaux d'un électromètre condensateur par deux fils de fer. Le contact semblait mauvais et pour l'améliorer ils mettent un peu d'eau au contact du fil de fer sur le zinc ; de très fines bulles apparaissent avec l'odeur de l'hydrogène, en fait un hydrogène phosphoreux dû aux impuretés.



k -Nicholson et Carlisle décomposent l'eau par la pile

Pensant avoir décomposé l'eau, suivant l'exemple de Lavoisier quelques années plus tôt, ils font un autre montage pour le vérifier. Un tube de 30 cm, rempli d'eau, est fermé aux deux extrémités par du liège, dans chaque bouchon, ils glissent un fil de cuivre, fixent le tube vertical comme l'indique la gravure (k) et relient les fils à la pile. Rien ne se produit, ils rapprochent les extrémités dans l'eau, à 5 cm des bulles apparaissent sur le fil relié au disque argent de la pile. L'autre fil rougit puis noircit.

Après deux heures, le tube est rempli d'un demi-cm³ de gaz, mélangé à l'air ; il détonne, c'est de l'hydrogène.

L'oxygène, lui, a formé avec le cuivre un oxyde noir.

En recommençant l'expérience avec des fils de platine, le gaz recueilli contient une partie d'oxygène et deux d'hydrogène. Ils ont réalisé la première **électrolyse**, de l'eau, en séparant l'hydrogène de l'oxygène, par action du courant, découvrant la grande application que deviendra l'**Électrochimie** :

Le courant électrique peut séparer un corps composé, l'eau, en ses éléments simples.

Réversibilité de l'électrochimie

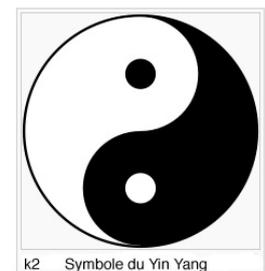
Blasés par deux siècles de découvertes électriques, nous ne sommes même plus étonnés de la presque simultanéité en 1800 :

– la pile, production de courant électrique par la dissociation de l'eau, corps composé, en ses deux éléments simples H et O, dont ce dernier se recompose au Zn.

– l'électrolyse, utilisation de courant électrique pour provoquer la dissociation de l'eau en ses deux composants gazeux O et H²

— En 1839, Grove produira l'inverse, sa pile à gaz produira du courant électrique en recombinant en eau O et H gazeux. (II-1)

La réversibilité est vraiment une grande loi de la Nature, comparable à la dualité *Yin* et *Yang* des philosophes chinois (k2).



k2 Symbole du Yin Yang

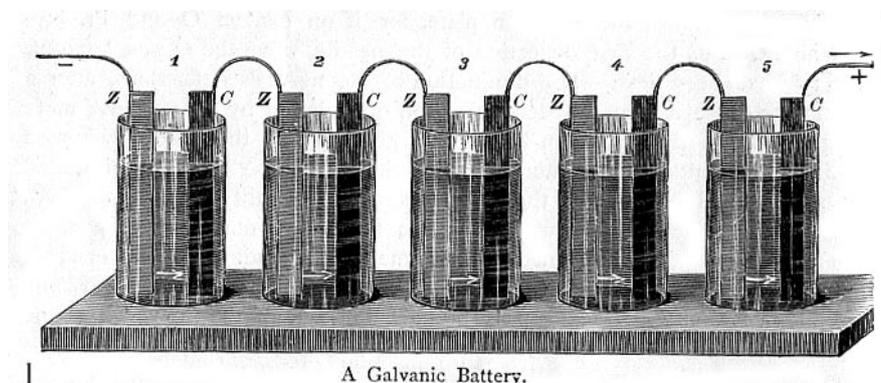
Une nouvelle électricité

Une première grande application de la nouvelle électricité dynamique, *l'électrochimie*, était née comme une ironie à l'encontre de Volta, obstiné à ne pas vouloir la reconnaître au cœur de sa pile.

Les expérimentateurs trouvaient des indices certains de la nature chimique du fonctionnement de la pile : l'effet était plus prononcé avec des solutions salines ou acides qu'avec de l'eau en principe pure ; la diminution progressive de l'intensité après une dizaine de minutes, résultant de l'altération visible du zinc et surtout de l'effet de polarisation, dépôt d'hydrogène sur le cuivre, qui sera le grand problème des piles dans les années à venir.

Volta avait aussi proposé une disposition plus pratique que l'empilage des rondelles de feutre qui soit coulaient s'il y avait trop de liquide, soit se desséchaient progressivement.

Ce dispositif était l'*appareil à couronnes ou à tasses* (1), les lames de cuivre et de zinc trempaient dans une tasse remplie d'eau acidulée. On reliait en série par des fils la lame cuivre d'une tasse avec le zinc de la suivante.



Volta est resté campé sur sa position jusqu'à sa mort en 1827, malgré les contestations qui s'affirmaient dès 1800 en Angleterre, celles de Wollaston et du jeune Humphry Davy, lequel en fera la démonstration irréfutable un peu plus tard.

Les conditions semblaient remplies pour que se déclenche une controverse semblable

à celle des voltaïstes contre les galvanistes ; mais cela paraissait peut-être trop mesquin de contester l'homme qui avait ouvert, sans le réaliser, un immense champ d'investigations, même avec un raisonnement faux.

Il peut paraître curieux qu'un physicien de la valeur de Volta ait abandonné pratiquement toute recherche dans le domaine qu'il venait de révéler, même avec un raisonnement erroné. Son cas n'est pas unique, encore de nos jours, il arrive souvent qu'un scientifique fasse faire à la connaissance un grand bond en avant, puis disparaisse presque du domaine concerné, laissant à d'autres les développements et approfondissements de sa découverte. Cela pourrait s'apparenter à une sorte de syndrome d'épuisement psychologique, après un gros effort intellectuel de plusieurs années (10).

Rapidement, le rapprochement se fit entre cette nouvelle *électricité* dite *galvanique* et l'*électricité ordinaire*, l'électricité statique du XVIII^e. Volta en était conscient. Mais il était difficile de faire le saut, entre l'électricité des dizaines milliers de volts, avec le courant infime d'une étincelle fugitive, et les quelques volts d'une pile dont la *force électromotrice* générait un fluide presque permanent pouvant atteindre quelques ampères (11).

Cependant nombre de savants, Wollaston en Angleterre, Van Marum aux Pays bas, Pfaff en Bavière, reproduisaient les effets chimiques de la pile avec leurs grosses machines électrostatiques ou batteries de bouteilles de Leyde, mais seulement en très faibles quantités.

Il y avait bien identité des deux fluides, malgré leurs différences de génération et d'effets.

1801 - Bonaparte accueille Volta à Paris

Volta souhaitait se rendre à Paris pour rencontrer des savants français et le nouveau protecteur de la République Cisalpine, devenue Royaume d'Italie après Marengo (12). Au cours de ce voyage, fin 1801, accompagné du chimiste Brugnatelli, il fait étape à Genève pour présenter la pile à ses collègues, de Saussure, Gaspard de La Rive et Pictet.

À Paris, il rencontre plusieurs savants et l'Académie l'invite à présenter ses recherches en trois séances, les 16, 18 et 20 brumaire de l'an IX. Muni du matériel nécessaire, il fait devant les académiciens l'expérience de la charge par contact de disques cuivre et zinc avec mesure à l'électroscope. Avec une pile de 98 éléments, il produit de fortes commotions, des étincelles avec une bouteille de Leyde-condensateur, la fusion d'un fil de fer, la détonation de son pistolet à hydrogène et la toute récente découverte de la décomposition de l'eau par les Anglais.

Bonaparte assista aux deux dernières séances, en tant que membre de l'Institut, et fut passionné par la découverte de Volta. Le physicien Robertson avait été invité par Volta, mais arriva en retard, il fut étonné du nombre de militaires qui entourait le bâtiment et fit à la demande de Volta l'expérience du pistolet qu'il raconte :

« La détonation du pistolet sembla réveiller un membre placé à l'autre extrémité de la salle, inattentif en apparence dont l'imagination planait peut-être sur le monde à cent lieues du galvanisme. Il parut sortir subitement d'une profonde préoccupation, me fixa sans doute à cause du bruit que l'arme électrique venait de produire; puis se tournant vers un membre voisin, Fourcroy, lui dit : voici des phénomènes qui appartiennent plus à la chimie qu'à la physique, vous devriez vous en emparer - C'est ainsi que je vis pour la première fois le premier consul Bonaparte. »

À la fin des séances, Bonaparte proposa à l'Institut de décerner à Volta un prix de 3000 F. Une commission fut chargée de répéter toutes ces expériences, le rapport consciencieux de Biot fut établi en décembre (13). Volta reçut de Bonaparte 6000 F pour ses frais de voyage, il fut décoré, nommé membre de la *consulte* italienne, puis sénateur de Lombardie et anobli Comte d'Empire en 1810 avec un blason peu classique « un quartier de gueules à une pile voltaïque et un condensateur d'argent ».

Cette mémorable séance a fait l'objet de deux peintures maintes fois reproduites, un tableau de Bertini exposé à l'Institut des sciences de Milan et une



Blason de Volta
Comte d'Italie



m Volta présente sa pile à Bonaparte

fresque au musée de Physique et Sciences naturel-les de Florence. Dommage que Napoléon Bonaparte, gloire des Français, n'ait pas consacré un peu plus de son intelligence et son énergie aux sciences, arts et organisation de l'Etat, problèmes qu'il a trop brièvement abordés avec succès, plutôt qu'à des guerres meurtrières, aux résultats plus qu'incertains.

Dans son exil à Ste Hélène il avait le temps de méditer et de noter ses intuitions : « Qu'est-ce que l'électricité, le galvanisme, le magnétisme ? C'est là que gît le grand secret de la Nature. »

Les débuts de l'électricité

L'année suivante, Bonaparte envoyait d'Italie une missive à Chaptal, ministre de l'intérieur pour lui demander de fonder un prix annuel de 60 000 francs, somme très élevée, pour encourager les travaux sur le galvanisme. Ce prix serait décerné, au jugement de l'Institut, au savant, même étranger, « dont la découverte fera faire à l'électricité et au galvanisme un pas comparable à celui qu'ont fait faire à ces sciences Franklin et Volta... mon but particulier étant d'encourager et de fixer l'attention des physiciens sur cette partie qui est à mon sens le chemin de grandes découvertes. »

Le prix ne fut jamais décerné. Il n'y eut aucune découverte vraiment majeure pendant 20 ans. En effet, cette révélation de l'électricité dynamique, un courant électrique permanent, était stupéfiante, mais on sentait les savants perplexes sur les chemins à suivre, pour exploiter cette découverte, suggérés par l'intuition de Bonaparte.

Trois domaines ont été néanmoins explorés dans les années qui suivirent :

– Tout d'abord un large champ de progrès s'ouvrait dans le domaine de l'électrochimie, il est traité plus loin .

– Dans le domaine de l'énergie, ce fut la capacité de production de chaleur qui surprit. Pepys construisit dès 1802 en Angleterre une grande pile avec soixante plaques de six pouces. « On brûla des fils de fer d'un dixième de pouce. La lumière de cette combustion était extrêmement vive... du plomb en feuilles brûlait avec vivacité après avoir rougi... l'argent en feuilles brûlait avec une lumière verdâtre très intense. »

– Un troisième domaine occupa beaucoup de monde pendant tout le XIX^e, les médecins, comme les charlatans, celui des propriétés curatives de l'électricité sous différentes formes. Les physiologistes reprenaient le flambeau de Galvani à la recherche des secrets de l'*économie animale*, peut être de la vie.

Il faudra attendre 1820, l'année Oersted-Ampère pour qu'on commence à entrevoir les immenses possibilités de l'électricité comme vecteur d'information avec le télégraphe puis vecteur d'énergie pour l'éclairage.

Volta, qui mériterait bien le titre de **père de l'électricité**, vécut jusqu'en 1827, chargé d'honneurs par Bonaparte. Il disparut de la scène électrique après 1802. En reconnaissance au découvreur de la *force électromotrice*, le premier congrès des électriciens de 1881 adopta le *volt* comme unité de tension, force électromotrice, potentiel et différence de potentiel (14).

Pour le centenaire de sa mort, en 1927, sa ville natale de Côme fit construire au bord du lac le « **temple Volta** », musée présentant tous les appareils créés par Volta (n).



n Tempio Voltiano - Como

Le visiteur de passage doit s'y arrêter, non pour l'architecture de ce petit temple néo-classique, mais pour se laisser émouvoir par la simplicité de ces appareils rustiques (v. début du chapitre), à l'origine du formidable bouleversement industriel qu'ils ont déclenché. Les appareils exposés sont des copies fidèles de ceux de Volta, les originaux ayant brûlé dans l'incendie du 8 juillet 1899 dans sa maison de Côme, à l'occasion de la commémoration du centenaire de la pile.

Einstein le visita et résuma avec une formule lapidaire :

« la pile est la base fondamentale de toutes les inventions. »

Mais l'exploitation de l'immense potentiel de l'électricité dynamique, qu'on ne pouvait pas percevoir à l'époque, ne se révélerait qu'après deux autres découvertes, l'électromagnétisme par Ampère, puis l'induction par Faraday.

L'étrange antériorité Parthe, -250

Toute l'histoire de la pile en fait une invention indépendante de l'air du temps, qui aurait pu se produire des dizaines ou centaines d'années plus tard. Quant à avoir été inventé un siècle plus tôt, rien en électrostatique ne laissait présager l'intérêt de cette force électromotrice tellement faible, d'un volt, indécélable par rapport aux dizaines de milliers de volts des machines à frottement.



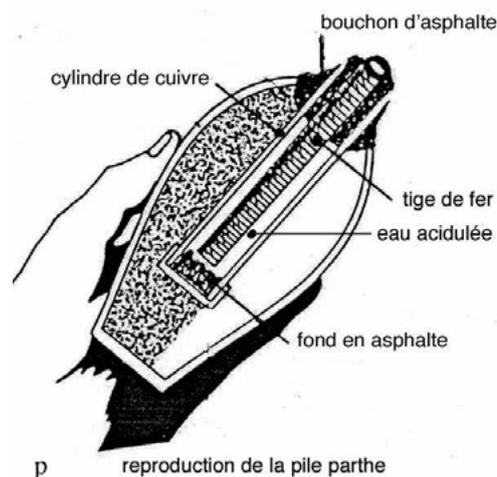
o The ancient battery in the Baghdad Museum

Et pourtant, en 1936, au cours de fouilles à Khujut-Rabuah, près de Bagdad, on découvrait des poteries d'usage indéterminé qui furent déposées au musée de Bagdad. Le site avait été occupé par les Parthes, peuple assez mal connu dont l'empire, vaincu par Rome, a couvert l'Est du Moyen-Orient pendant plusieurs siècles, vers —250 ; peut-être aussi par d'autres auparavant.

En 1938, l'archéologue allemand Wilhelm König qui dirigeait le musée fut intrigué par ces poteries, des petites jarres en terre cuite, hautes de 15 cm, refermant un cylindre de cuivre, et dont le fond devait être constitué d'un capuchon en cuivre soudé au plomb, et au milieu une tige en fer très oxydée. Le tout devait avoir été maintenu à la partie supérieure par du bitume (o). Il pense qu'il s'agit d'une pile, *ein galvanisches Element*. De retour à Berlin en 1940, il mentionne cet objet dans son livre, *Im verleren Paradies*, sur ses neuf années passées en Mésopotamie, l'Irak sous contrôle anglais depuis 1920.

L'objet comporte tous les éléments d'une pile électrochimique ; ne manquent pour fonctionner que l'électrolyte et une connexion métallique extérieure au tube, sans doute complètement corrodée. Une dizaine d'objets identiques auraient été trouvés non loin, à Ctesiphon.

Après WW2, plusieurs chercheurs, dont Wilard Gray du laboratoire General Electric, l'archéologue Arne Eggebrecht directeur du musée d'Hidelsheim ont réalisé des copies exactes. En les remplissant de jus de raisin, vinaigre, jus de citron, la pile donne des tensions de 0,5 à 1,5 volts (p). Ces reconstitutions apportent la confirmation qu'il pourrait s'agir d'un générateur électrochimique de courant ; la rigueur scientifique demanderait qu'on démontre qu'il ait une utilisation pratique, pas possible avec certitude jusqu'à présent, malgré plusieurs propositions.



p reproduction de la pile parthe

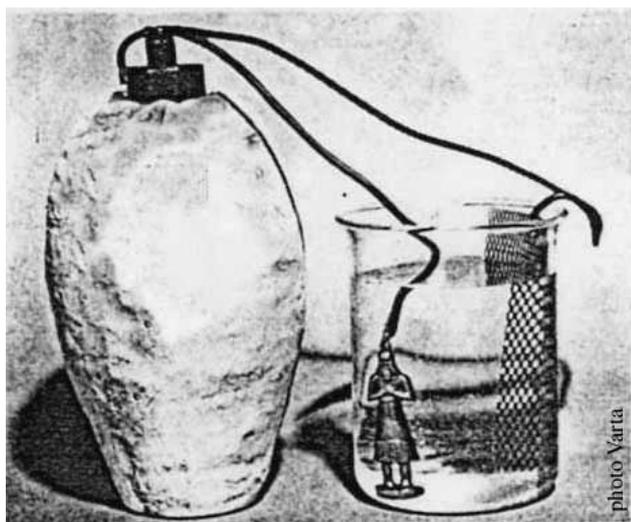
Les Parthes, ou leurs prédécesseurs, Perses, Assyriens ou Sumériens auraient donc inventé **un générateur électrique plus de 2000 ans avant Volta**, sans rien connaître de l'électricité. Mais ils n'avaient pas besoin de la connaître pour l'utiliser, pas plus que Volta. Mais quelle pourrait être l'utilisation du courant de cette pile ? Sur ce point il n'y a que des hypothèses, qui resteront longtemps invérifiables, surtout à la suite des destructions et pillages des sites archéologiques irakiens depuis 2003.

Des quatre grands domaines d'application actuels de l'électricité, lesquels auraient été accessibles, sans connaissances électriques, avec une simple pile d'un volt débitant au plus un ou deux ampères ?

Certainement pas une application énergétique, ni le transport d'information nécessitant de longs fils et un récepteur du signal. Peut-être un usage médicinal, ou une autre application maintenant oubliée.

L'hypothèse la plus vraisemblable serait un usage électrochimique. L'électrolyse de l'eau salée, très simple, découverte par hasard quelques mois après la pile en 1800, ne présentait pas de difficulté pour les Anciens. En plus d'être inflammable et détonnant, l'hydrogène et l'oxygène obtenus peuvent avoir trouvé une application oubliée aujourd'hui, par exemple l'éclairage par leur flamme de combustion. Ou bien encore la galvanoplastie, dorure ou argenture d'objets en bronze. König avait dans le musée de Bagdad des pièces venant d'autres sites sumériens, datés vers —4500 ans, argentées ou dorées avec des indices éliminant les autres techniques possibles, le martelage ou avec le mercure.

Cette hypothèse avait déjà été mentionnée par Mariette en 1850 pour expliquer la dorure et le cuivrage très fin d'antiques objets égyptiens, de même la fine épaisseur de la grande statue de cuivre du musée du Caire, haute de près de 2 m et pesant seulement 5 ou 6 kg. Pour le cuivre, plusieurs sels de cuivre étaient connus, le plus courant étant le sulfate de cuivre abondant en Afrique, le vitriol de Chypre. Il n'y avait même pas besoin d'une pile extérieure, mais constituer, sans le savoir, une pile en court-circuit. La cathode étant la pièce à cuivrer qui trempait dans le bain de sulfate, elle était reliée électriquement par l'extérieur à une autre pièce métallique, en fer ou zinc formant anode, aussi immergée dans le bain. C'est le processus qu'avait découvert Jacobi à l'intérieur de la pile Daniell. (II-1) Mais la dorure électrochimique nécessite de disposer d'un sel d'or (cyanure ?), probablement inconnu à l'époque.



q dorure avec une pile parthe

À l'occasion d'une exposition en 1978 "Sumer, Assur, Babylon" dans son Musée d'Hildesheim, en Basse-Saxe, puis à Berlin, l'égyptologue Arne Eggebrecht a fait réaliser cette dorure devant les visiteurs. Les spécialistes en électrochimie des entreprises Bosch et Varta ont cherché le composé d'or qu'auraient pu utiliser les Parthes pour faire de la dorure électrochimique avec le courant de leur pile. Ils ont trouvé un cyanure d'or obtenu par martelage d'une feuille d'or entre deux morceaux de cuir pourris ou mal tannés, opération classique à l'époque pour obtenir des feuilles d'or très fines.

La photo (q) publiée dans la revue ETZ montre l'expérience réalisée avec une copie de la pile et du cyanure obtenu à l'ancienne. Une petite statue était dorée en 2 h 30.

Il est très improbable que les Parthes ou les Égyptiens aient acquis des connaissances électriques. Comme les anciens Chinois et les Romains, seule la technique les intéressait, pas la théorie. Ils n'avaient pas besoin de connaître l'électricité pour relier la pile à un quelconque appareil d'utilisation. Cependant, on reste étonné de la série de hasards, d'observations et de bricolages qui ont abouti à ce résultat (15).

Tant qu'un archéologue ou un physicien ne trouvera pas une autre explication valable à la présence d'un tube de cuivre et d'une tige de fer dans un vase en terre cuite de cette époque, l'hypothèse de la pile, vérifiée par l'expérience, reste l'explication la plus probable. La mystification, rare mais possible chez les scientifiques, paraît exclue.

En fait, nous n'avons qu'une partie d'un appareil, dont une autre partie nous manque.

Comme dans toute recherche, il faut se garder des extrêmes, s'enthousiasmer sur une hypothèse difficile à vérifier, ou la rejeter pour un détail marginal, et admettre modestement que notre science limitée ne peut pas tout expliquer.

La pile Parthe reste cependant un cas intéressant et une leçon de modestie pour les scientifiques comme les historiens.

2000 - Un bicentenaire trop discret

Tout au long du XIX^e siècle, historiens et scientifiques, hommes publics, n'ont cessé de souligner et commémorer l'invention de la pile comme la naissance de cette merveilleuse électricité qui révolutionnait la vie quotidienne, l'industrie, les rapports sociaux et la pénibilité du travail.

Au centenaire de 1899 (r), Côme fut le centre d'importantes expositions et congrès. L'exposition française de 1900 par contre ne fit qu'une assez modeste place à ce centenaire. Au XX^e siècle, dans la littérature technique et historique, la pile de Volta n'était plus qu'un épisode entre la bouteille de Leyde, la bobine de Ruhmkorff et la lampe d'Edison.

Étrange amnésie de la naissance de l'électricité. **L'an 2000 aurait pu être un grand bicentenaire de l'électricité**, ce socle de notre civilisation industrielle, avec la débauche lumineuse qui l'accompagna. En France, seule une intéressante et trop discrète exposition fut organisée par le Conservatoire National des Arts et Métiers, le CNAM, pour les spécialistes d'histoire des sciences. La presse, même technique et scientifique, resta muette à de rares exceptions.

Probablement un effet indirect d'une étonnante contradiction de la société des pays riches, dits développés :

- D'une part, la méfiance et un certain rejet intellectuel des sciences et techniques, considérées comme dangereuses et polluantes ;

- D'autre part une boulimie de consommation et d'utilisation d'une foule de biens et services créés par ces mêmes techniques.

Le bicentenaire oublié aurait été un moyen de remonter la barre en y consacrant au moins autant de moyens médiatiques que celui qui l'avait précédé, le bicentenaire de la révolution. Un événement qui a beaucoup moins changé concrètement et durablement le monde, et même la vie des Français, que l'irruption de l'électricité au XIX^e siècle. Mais l'histoire des sciences et techniques, nécessitant quelques connaissances en ces matières, tant pour l'écrire que la comprendre, intéresse bien moins les médias, donc le public, ou l'inverse, que l'histoire politique avec ses cahots, guerres et révolutions.

Pour conclure cette histoire de la pile de Galvani –Volta, premier générateur d'électricité, citons à nouveau l'éloge fait en 1833 par François Arago, inventeur de l'électro-aimant et découvreur du mystérieux magnétisme de rotation :

« 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. »



Deux siècles plus tard, des sept découvertes de l'électricité, la première reste la fondatrice, tant par les invraisemblables péripéties de son processus que par les pistes ouvertes aux suivantes.

Que serait la révolution industrielle sans l'électricité ? Plus d'une semaine pour transmettre une information de Londres en Amérique ? L'éclairage au gaz ? La distribution facile de l'énergie.

Par la richesse de ses conséquences, elle est comparable à la découverte des ondes électromagnétiques par Maxwell –Hertz, près d'un siècle plus tard.

Compléments

0 - Le lecteur pourrait être surpris de trouver l'histoire de **la pile comme une découverte du XIX^e**, alors qu'elle s'est déroulée de 1780 à fin 1799. Ceci pour souligner que cette invention-découverte n'était pas une évolution prévisible, ni un simple progrès de l'électrostatique du XVIII^e, mais l'ouverture d'une ère scientifique et technique totalement nouvelle, dont la richesse est l'objet principal de ces cinq livres.

L'invention de la pile ne doit à l'électrostatique que deux hasards indirects :

– La présence d'une machine électrostatique sur la table d'expérience de Galvani, qui provoqua par hasard des travaux pour expliquer ce phénomène, puis la non-découverte des ondes électromagnétiques.

–Volta, l'une des compétences de l'époque en électrostatique, avait fabriqué par hasard un appareil sans utilité pratique, **l'électroscope-condensateur**, qui se révéla indispensable quelques années plus tard pour détecter la très faible tension de contact entre un disque de cuivre et un autre en zinc, un volt environ.

Un tel exemple a été bien illustré dans une pièce de théâtre puis un film, supervisé par des scientifiques, « *les palmes de Monsieur Schultz* », sur la vie de Marie et Pierre Curie. Grâce à un appareil de mesure très sensible, développé par Pierre sans objectif précis, Marie découvre le polonium et le radium en 1903.

1 - **L'histoire de la pile de Volta** a été décrite par des dizaines d'auteurs en France et à l'étranger, avec nombre de versions différentes, copiées souvent avec leurs erreurs de faits ou d'interprétation. En dehors des écrits des acteurs eux-mêmes, Galvani et Volta, en principe incontestables, j'ai considéré comme les plus fiables les textes les plus anciens, les plus proches de l'événement, écrits par des auteurs de compétence assez bien vérifiable. Cependant le long récit plus tardif du célèbre vulgarisateur du XIX^e, Louis Figuier, sur une centaine de pages, est valable à quelques petites erreurs près. Il signale d'ailleurs qu'il avait trouvé 21 versions différentes de l'histoire. Cependant, cet auteur consciencieux n'écrit presque rien sur le point crucial, comment Volta a-t-il procédé pour arriver à sa pile en découvrant une théorie exacte, celle du contact bimétallique, mais inapplicable à son appareil ? Il n'a pas perçu ou osé relever l'erreur fondamentale qui a conduit à la découverte. Il lui manquait peut-être quelques compétences scientifiques. La vulgarisation, on le sait, est un art difficile, elle demande un haut niveau de compétences pour expliquer clairement et simplement l'essentiel de choses compliquées.

Une partie des *Merveilles de la science* de Figuier a été rééditée par l'AHEF, Association pour l'Histoire de l'Électricité en France.

Parmi les documents anciens :

- L. GALVANI, *De veribus electricitatis in motu musculari commentarius* t. VII *De Bononiensi scientiarum et artium instituto atque academia commentarii*.

- PIERRE SUE, *Histoire du galvanisme* et analyse...T.1-2, Bernard, Paris, 1802/1805 - accessible sur cnum.cnam.fr

- E. BECQUEREL, *Histoire de l'électricité et du magnétisme*, Firmin Didot, Paris, 1858.

- L. FIGUIER, *Merveilles de la science*, Furne, Jouvot et Cie, Paris, 1867 et ultérieures

Parmi les documents récents parus pour le bicentenaire :

- La Revue du Musée des arts et métiers n° 31, 12/2000
- PAUL BARBIER -*Bonaparte et les savants...*, Bulletin AHEF n°34, 12/1999
- MICHEL DURR - *Il y a deux cents ans, aux débuts de l'électricité et de la chimie*, Bull. Société des amis d'Ampère 10/1999
- Sur ampere.cnrs.fr. Video interessante : Des expériences de Galvani à la pile de Volta

2 - Les ondes électromagnétiques seront prédites mathématiquement par Maxwell en 1864 et découvertes par Hertz en 1888. Le premier détecteur pratique d'ondes a été le cohéreur de Branly (1890)...précédé par les cuisses de grenouille.

Il était logique que les dizaines d'auteurs ayant raconté cette histoire au XIX^E siècle, avec l'explication du choc en retour, n'aient pas évoqué cette découverte inaperçue des ondes électromagnétiques par le couple Galvani. Mais, sauf erreur, on ne la trouve pas non plus dans les histoires de l'électricité du XX^e, postérieures à la découverte de Hertz. L'histoire, celle des sciences comme les autres, doit être remise en question avec l'évolution des connaissances.

Comme l'explication du choc en retour ne tient plus avec les connaissances que nous avons sur la foudre depuis plus un siècle, j'ai été amené à cette explication. Elle est simple à vérifier expérimentalement, suite à des recherches professionnelles sur le comportement de l'arc électrique et son rayonnement électromagnétique parasite, qui perturbe souvent les mesures d'un oscillographe, sensible comme les grenouilles. Le plus difficile pour cette expérience est d'attraper un batracien et de l'écorcher vif convenablement.

Lucia Galvani, inconnue, se trouve être l'une des deux seules femmes ayant participé à des travaux scientifiques sur l'électricité au cours du XIX^e siècle. La seconde sera Hertha Ayrton qui a fait la première recherche sur l'arc électrique en 1895 (III-1). Elle a ensuite aidé Marie Curie à se dégager du soupçon de dépendance scientifique de son mari, Pierre Curie, lors de l'attribution du prix Nobel. Au siècle précédent, sont un peu connues la mathématicienne Émilie du Châtelet, compagne de Voltaire, et Marie Anne Lavoisier. Celle-ci devait avoir auprès de son mari, un rôle d'assistante semblable à celui de Lucia.

Pour en savoir plus sur les *femmes inventives* : URL femmes-ingenieurs.org

3 - L'expérience de Galvani avait une antériorité, rarement signalée. Swammerdam (1637 - 1680), un naturaliste hollandais ayant vécu en France, avait obtenu la contraction d'une patte d'une grenouille écorchée comme celle de Galvani, en reliant le nerf à la cuisse par un fil d'argent en contact avec du cuivre. C'était l'une de ces découvertes trop prématurées pour que quelqu'un cherche à comprendre.

Il avait fait son expérience devant le grand duc de Toscane en 1658, consignée dans son mémoire *Biblia natura*. Le fait oublié a été rapporté en 1841 dans l'*Epertologie générale* de C.Duméril et les *Leçons sur la physiologie* de Milne Edwards. Ce dernier le rappelle dans *La Nature* 1881, p.210.

4 - Lavoisier n'a pas été guillotiné en novembre 1793 en tant que savant, mais avec ses 27 collègues fonctionnaires, pour son "emploi fictif" dans le corps des "fermiers généraux", les collecteurs d'impôts, que Louis XVI lui avait accordé en tant que mécène ; il pouvait ainsi faire ses recherches sans souci financier, en laissant le soin de la collecte des impôts à des subalternes.

Ce fut l'un des nombreux "dégâts collatéraux" de la révolution. Marat déclarait d'ailleurs que la République n'avait pas besoin de savants. Opinion reprise par le célèbre inspirateur chinois de la révolution culturelle, qui envoyait les savants cultiver les rizières.

Précisons que la République a remplacé, pour diriger la collecte des impôts, les fermiers généraux par un Trésorier payeur général par département ; fonction recherchée parce qu'il est le fonctionnaire le mieux payé du département, au-dessus du préfet m'avait dit l'un de ces personnages. Aucun nouveau Lavoisier ne s'est encore révélé dans cette catégorie de fonctionnaires de haut niveau, bien que la guillotine soit supprimée.

5 - Cette **théorie du potentiel de contact** entre deux métaux différents, à la même température, suggérée par Bennet, n'a pas apparemment été signalée ; celle sur Sultzer, moins plausible l'a souvent été.

La théorie a été niée par Faraday, mais il utilisait par erreur un galvanomètre, appareil de mesure inadapté. Il faut comme Volta utiliser un appareil d'électrostatique mesurant un potentiel, sans aucun débit de courant, tel l'électromètre de Thomson (1850)

Elle a été étudiée dans le courant du siècle par plusieurs savants, Seebeck, Pfaff, Kohlrausch, mais sans application directe ; en particulier par Sir William Thomson, qui proposait une méthode originale de détection utilisant un électromètre simple de sa conception dans *Papers on Electro-Statics*. p.318 et Proc. Roy. Soc., 1867, vol. XVI, p.71.

De même, AYRTON ET PERRY *Théorie du contact de l'action voltaïque*, Proc. Roy. Soc., vol. XXVII, 1878, p.196.

On peut retrouver ces éléments dans divers ouvrages :

- Traduction anglaise de l'Allemand: Dr A. RITTER VON URBANITZKY, *Electricity in the service of Man*, ed. Cassel, Londres, 1890

- Traduction française de l'Anglais : J.E.H. GORDON, *Traité expérimental d'électricité*, T.2, ed. Baillière, Paris, 1881.

Maxwell mentionne simplement cette théorie, sans commentaire. Elle n'a semble-t-il pas reçu d'application directe.

Il faut néanmoins souligner que le potentiel de contact entre métaux joue un rôle essentiel dans les composants à semi-conducteurs. Deux inventions fondamentales de l'électricité, la pile et le transistor se rejoindraient ainsi sur une même base physique. Une thèse intéressante pour un doctorant.

6 - Quelques documents d'époque permettent de **retracer la voie suivie par Volta**, pleine d'hésitations et d'interprétations difficiles. Au début, l'électricité de contact était étudiée comme une question d'électrostatique, des déplacements de charges et des potentiels, mais la notion d'énergie en était absente. Il semble que Volta était trop imprégné de son passé dans l'électrostatique pour envisager la voie chimique. Dans une laborieuse étude sur les chaînes de conducteurs générateurs d'électricité, il classait les métaux en première classe et inventait une deuxième classe pour les *conducteurs humides*, qu'il avait découvert comme indispensables, mais avec un rôle assez flou.

L'ensemble des mémoires et lettres d'époque est rassemblé dans *Histoire du galvanisme* de Pierre Sue, signalé ci-dessus

8 - La plupart des variantes de l'histoire, dont celle, officielle, de Volta, ne parlent pas de **papier mâché**, mais de tissu ou feutre humidifié à l'eau salée ou acidulée. Cela faisait plus scientifique que le papier mâché.

Cette dernière version paraît plus vraisemblable. D'après deux sources, Volta lisait un journal sur l'élection d'un nouveau pape, perplexe devant l'électroscope qui ne déviait pas dans une opération type b. Quand l'idée lui vint de simuler les "humeurs" du muscle de la grenouille en contact avec l'arc en zinc, quoi de plus pratique et naturel que de prendre un morceau de journal, cracher dessus pour l'humidifier avec sa propre salive, une humeur biologique naturellement saline, plutôt que d'aller chercher de l'eau acidulée ou salée, dont on ignorait la propriété conductrice ?

9 - Ce **processus de la double erreur**, volontaire ou non, l'une annulant plus ou moins l'autre est connue des étudiants et expérimentateurs. Si elle est volontaire, cas d'un élève qui connaît le résultat d'une manip, mais n'arrive pas à le justifier, l'une de ses mesures étant fausse, c'est de la tricherie ; si elle est involontaire, c'est une méconnaissance de la théorie. Mais Volta, lui, était excusable, le principe de la conservation de l'énergie ne serait découvert que 40 ans plus tard.

D'ailleurs il n'était pas le premier, avant lui, Newton avait fait une théorie corpusculaire de la lumière avec des explications fausses, mais sa théorie était juste.

10 - Ce syndrome « d'épuisement intellectuel » justifie l'opinion parfois suggérée dans les débats sur l'organisation de la Recherche, toujours actuels, que le chercheur professionnel à vie, jusqu'à sa retraite, peut être une erreur. Sauf cas particuliers, la productivité inventive du chercheur ne couvrirait que les 20 à 25 premières années de sa vie active, comme le montre la suite de l'histoire de l'électricité. La plupart des récipiendaires de prix Nobel scientifiques sont parfois assez âgés, mais couronnant une découverte résultant de recherches effectuées vers la trentaine.

Pressentant ce ralentissement, j'ai personnellement quitté en partie la recherche-développement après la cinquantaine, Heureusement l'âge et la méthodologie de la recherche développent d'autres potentialités. Mais l'expérience, une qualité pour nombre d'activités, a tendance à bloquer la prise de risque, inhérente à l'incertitude de l'inconnu. Les innovateurs anticonformistes ont souvent été révolutionnaires à 20 ans, l'âge où il est normal et peut-être souhaitable de rêver à changer le monde.

11 - Les termes de *fluide galvanique*, de *galvanisme* sont un peu surprenants pour désigner les effets de la pile électrique, basés selon Volta sur le contact de deux métaux, alors que Galvani soutenait que le fluide prenait naissance dans la grenouille.

On ne trouve le terme *électricité voltaïque* que dans quelques documents anciens, mais partout de *courant galvanique*. Cette dérive sémantique s'est étendue aux applications électrochimiques, la *galvanoplastie*, dépôt de métal, la *galvanisation*, dépôt de zinc à chaud. De même comme synonyme de courant, le *galvanomètre* qui mesure l'intensité, la *galvanothérapie*.

Il est possible que les scientifiques de l'époque « souhaitent » ainsi honorer la mémoire de Galvani, cet homme de haute valeur humaine et scientifique, mort dans la misère, sans lequel Volta n'aurait jamais fait sa découverte. Bien qu'il ait eu l'intuition d'un fluide d'origine animale excitant les pattes de grenouille, Galvani est mort avant que la pile soit inventée par Volta et son effet, le courant soit découvert.

12 - Vis-à-vis du nouveau pouvoir instauré par l'autocrate révolutionnaire en Italie, Volta était un « collabo », suivant la terminologie récente, et Galvani un « résistant » courageux, mais du côté des perdants cette fois. De nos jours, les résistants minoritaires luttant contre une oppression totalitaire ou occupation armée avec de très faibles moyens sont des terroristes, tant qu'ils n'ont pas gagné leur lutte. Non, Galvani n'était pas un terroriste, mais l'histoire enseigne que collabo ou résistant, il vaut mieux être du côté gagnant pour survivre.

13 – Rapport « ...sur les expériences du citoyen Volta.

Compte-rendu à la classe des sciences mathématiques et physiques ... » Commission pour vérifier les phénomènes du Galvanisme. Accessible sur URL cnum.cnam.fr

14 - Le volt est depuis 1961 une unité dérivée du Système International d'unité SI, défini comme 1 watt par ampère - $1V = 1W/A$. L'ampère étant l'unité électrique fondamentale dont sont dérivées toutes les autres.

15 - Une pile Parthe était visible au musée Roemer Pelizaeus d'Hildesheim, près de Hanovre ; d'autres peut-être encore au musée de Bagdad, échappées au pillage de la « libération ».

Quelques sources :

W. KÖNIG -*Ein galvanisches élément aus der Partherzeit ?* Forschungen und Fortschritte 14 (1) 1938

- W. KÖNIG *Im verloren Paradies, Neun Jahre Irak*, p.166, Brunn, Rohrer München, Vienne, 1939.

- MACKENZIE J. *An early electric cell ?* Journal the Institute Electrical Engineers 6, p.356- 1960

- Revue *Cuivre laitons et alliages*, n°5,1971

- *Antike Batterie*, revue ETZ-b, bd 30, (1978), H 26

- *Elektrotechnik vor 2000 Jahren*, revue ETZ, bd 100, 1979, H.25, p.1466

- EGGERT G. -*The enigmatic battery of Bagdad*, Proceeding 7th Europ. Skeptics Conf., 1995

De nombreux sites internet (mot clé : pile parthe) donnent des versions variées sur cette question, mais difficilement crédibles compte tenu de l'amalgame entre faits réels vérifiables et hypothèses farfelues sur les géniales civilisations perdues !

Malgré des sources assez nombreuses, considérées comme fiables, et l'existence d'objets presque tous disparus, les scientifiques d'aujourd'hui, habitués à l'incertitude, peuvent considérer que la probabilité pour que cette pile Parthe soit une erreur d'interprétation ou une mystification est très faible. Bien d'autres questions sur les instruments utilisés par les anciens, égyptiens et autres, restent toujours sans réponse. Par exemple la façon dont a été taillée à moitié, en creux, l'obélisque de la carrière de Louxor visitée par des millions de personnes.

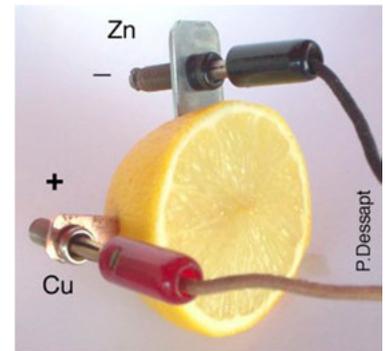
Arne Eggenbrecht, décédé, paraît avoir été un scientifique sérieux. Ses successeurs actuels au Musée n'ont pas d'archives de 20 ans et paraissent ignorer l'exposition de 1978, qui s'est prolongée à Berlin en 1879, rapportée par la revue d'électricité sérieuse ETZ, et d'autres journaux allemands.

16 - Empruntons à Cavanna cette invention d'une autre **pile étrange** : « Si l'on plonge un illettré total et une marchande de gaufres dans un bain de yaourt et qu'on les réunit par un fil de cuivre de diamètre convenable, on obtient un courant électrique tellement faible qu'il ne peut servir à rien. » Petite encyclopédie portative pour consoler les bons à rien, Ed Square, Paris, 1979

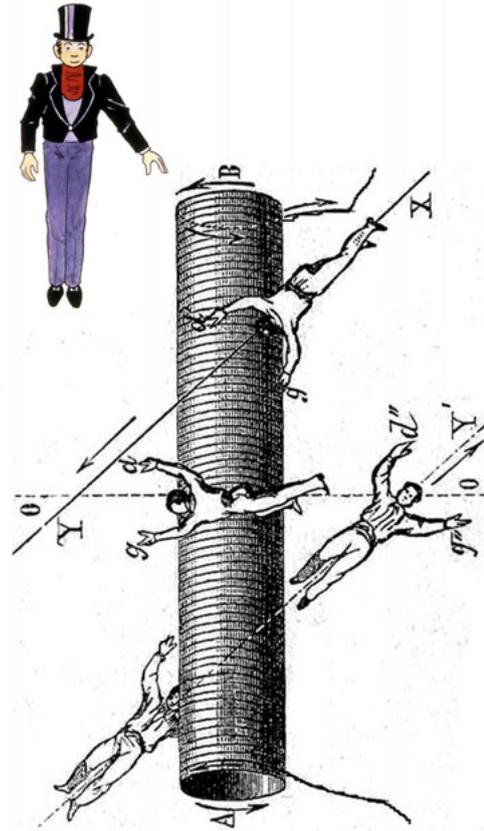
17 - Une pile un peu plus puissante a été inventée par Pierre Dessapt - URL *Raconte-moi la radio* dspt.perso.sfr.fr. Économique, adaptée à l'électronique, elle ne nécessite qu'une lame de cuivre et l'autre de zinc avec un demi citron. (s)

Mais il est très douteux qu'on puisse démarrer une voiture en panne d'accus avec 6 citrons coupés en deux. On obtiendra des volts, mais trop peu d'ampères.

Quand même, le fonctionnement du cerveau humain est bien un mystère : pourquoi Galvani, Volta et une vingtaine de collègues ont-ils mis 20 ans pour trouver quelque chose d'aussi simple, qu'un de nos contemporains a trouvé en quelques minutes, deux siècles plus tard, avec un citron, un morceau de cuivre et un autre de zinc ou de fer ?



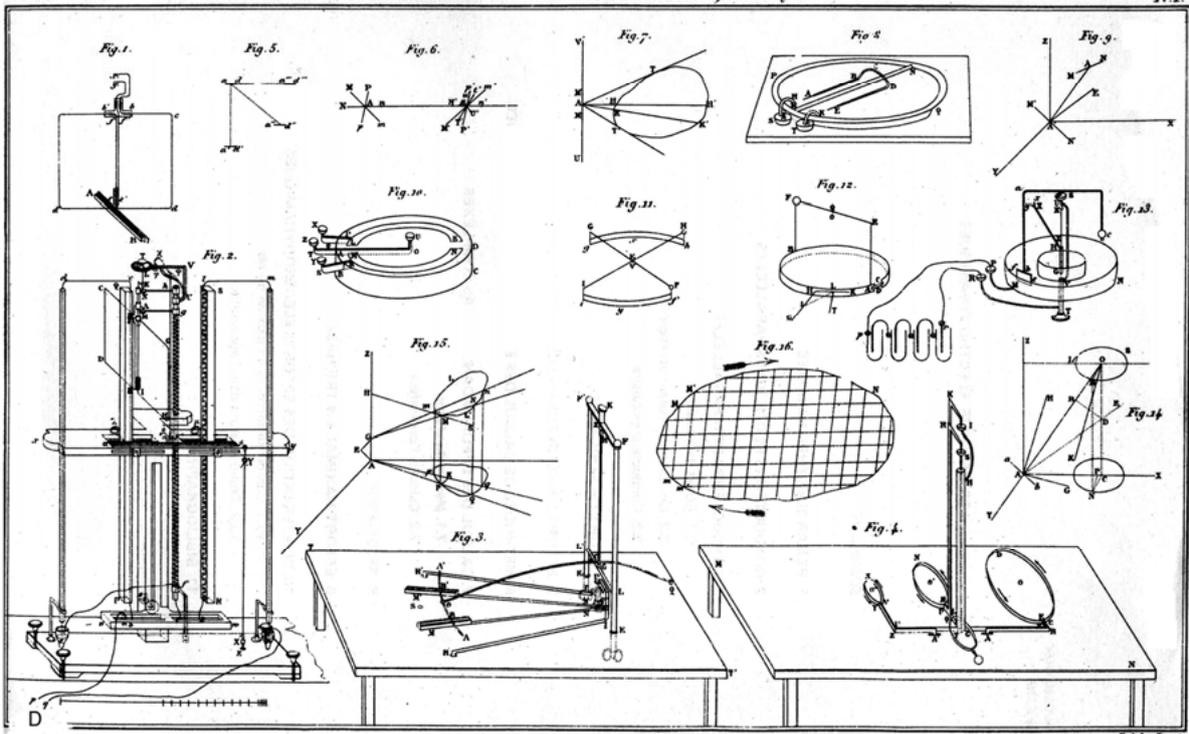
L'électricité, son courant invisible, était totalement imprévisible



*Le bonhomme cherche
la force d'Ampère*

Théorie des Phénomènes Electro-dynamiques.

Pl. 1.



4 - L'électromagnétisme

L'électricité dynamique crée le magnétisme

Oersted et Ampère

Pour mieux comprendre cette deuxième découverte fondamentale de l'électricité, il est utile auparavant, de humer l'air du temps en 1820, vingt ans après la pile de Volta.

L'électricité de la pile, une autre électricité

Dès les premières années du XIX^e siècle, les physiciens ont eu à faire de profonds efforts de réflexion et de pratique expérimentale, pour pénétrer dans un nouveau monde, celui de **l'électricité galvanique**, ou pour nous, **dynamique ou en mouvement**, que la pile faisait circuler dans un fil joignant ses deux pôles. Il avait certes quelques similitudes, mais surtout de fortes différences avec l'ancien monde de l'électricité (ordinaire), nom qui subsista jusqu'en 1820, devenu alors l'électrostatique. Ensuite l'électricité ne désigna plus que celle qui nous est familière, l'électricité dynamique, ou tout simplement l'électricité.

La pile qui possédait, selon Volta, une *force électromotrice* capable de faire circuler un courant permanent dans un circuit extérieur, n'avait rien de commun avec les grosses machines électrostatiques à manivelle. Un simple contact suffisait à faire jaillir une étincelle fugitive, dont on ignorait, bien sûr, que c'était un très bref courant à haute fréquence dans l'air ionisé, la foudre en miniature. L'électroscope à feuilles d'or n'avait plus d'utilité puisque cette force permanente, en principe, dépendait uniquement du nombre d'éléments de la pile, quelques volts incapables de faire dévier un électromètre ordinaire. Il y avait un circuit à établir avec un fil conjonctif, qui "joint", pour faire circuler l'électricité d'un pôle de la pile à l'autre, directement ou à travers un autre élément.

Surtout quelque chose transitait dans ce fil, le *conflit électrique*. Ce terme de conflit était moins vague que l'ancien terme de fluide, il résumait l'idée que circulaient dans le fil deux flux en sens contraire qui se croisaient, l'un, boréal, d'électricité positive sortant du pôle positif (zinc) pour rentrer au pôle négatif (cuivre), l'autre, austral, d'électricité négative allant du négatif au positif. C'était une adaptation dynamique du principe coulombien des deux électricités statiques. Quand il devint nécessaire de définir un sens unique et global à cet écoulement, on prit en compte celui du seul courant positif. Il est vrai qu'actuellement, on considère dans les électrolytes et les plasmas gazeux, que le courant est bien constitué de deux courants inverses, mais très inégaux, d'ions positifs et d'électrons négatifs.

On était encore très loin de supposer que ce fil pouvait véhiculer de l'énergie et non pas seulement des charges, notion d'ailleurs floue à l'époque.

Quant aux **phénomènes d'attractions et répulsions** entre positif et négatif, on ne savait plus entre quoi ils pourraient bien s'exercer, certains ont dû essayer d'approcher les pôles de deux piles, pour voir, sans résultat.

Un autre aspect avait un peu disparu des préoccupations, **le magnétisme** ; pourtant depuis Thalès, les scientifiques hésitaient à considérer les deux phénomènes magnétisme et électricité comme des apparences différentes d'un même principe. Leur propriété commune était ce pouvoir d'attraction à distance que Coulomb avait chiffré dans deux lois, comme proportionnel à l'inverse du carré de la distance. Coulomb avait nettement déclaré que cette ressemblance n'était en rien une identité. Ampère lui-même, écrivait en 1802, dans la présentation de son cours au lycée de Bourg : « Le professeur démontrera que :

« Les phénomènes électriques et magnétiques sont dus à deux fluides différents et qui agissent indépendamment l'un de l'autre ».

La découverte de la nouvelle électricité galvanique allait-elle modifier ce point de vue ? Il est certain que l'idée était dans l'air, il y avait probablement un rapport entre cette électricité et le magnétisme :

– On rapportait plusieurs cas d'action étrange de la foudre, provoquant la désaimantation ou même l'inversion des pôles d'une boussole marine ;

– Les aiguilles aimantées au voisinage de machines électrostatiques s'agitaient bizarrement au moment de la décharge ;

– Les deux pôles plus et moins de la pile ne seraient-ils pas analogues à ceux d'un aimant ?

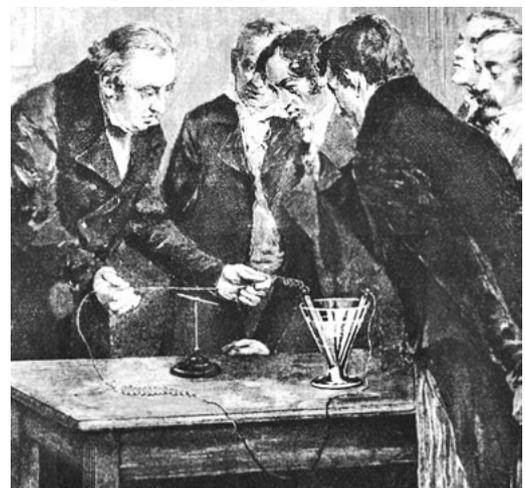
– Un physicien et romantique allemand, W. Ritter, connu pour des expériences ingénieuses sur le galvanisme, portait l'analogie jusqu'à l'identité, cela restait encore à prouver.

Oersted, le conflit électrique fait dévier une aiguille aimantée

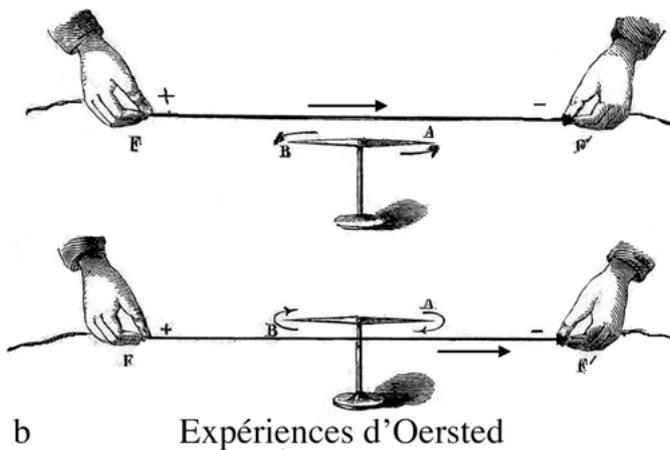
Ritter en avait parlé avec son ami, Jean Christian Oersted, professeur à l'université de Copenhague. Ce dernier avait publié en 1812 un *Aperçu des lois chimiques naturelles*, il y écrivait « Nous tâcherons pour prouver mieux encore l'universalité des deux forces chimique et électrique, de montrer qu'elles produisent aussi des phénomènes magnétiques. »

Ce n'est donc pas un hasard, comme on l'a souvent écrit, mais le résultat de nombreux essais, qu'il arrivât à la preuve dans l'hiver 1819. Aussi, il est peu probable qu'il constata cette déviation d'une aiguille aimantée pendant un cours d'électricité (a). Il attend cependant des mois, août 1820, pour envoyer la nouvelle à plusieurs académies, sous forme d'une note de quelques pages, en latin selon la tradition :

« Expériences relatives à l'effet du conflit électrique sur l'aiguille aimantée - Les premières expériences, sur le sujet qui fait l'objet de ce mémoire, remontent aux leçons que j'ai faites l'hiver dernier sur l'électricité, le galvanisme et le magnétisme. Leur conséquence principale est que l'aiguille aimantée est déviée de sa position par l'action de l'appareil voltaïque et que cet effet se produit quand le circuit est fermé et non lorsqu'il est ouvert ; c'est pour avoir laissé le circuit ouvert que de célèbres physiciens n'ont point réussi, il y a quelques années, dans des tentatives de ce genre. »



a Expérience d'Oersted



Cette allusion concerne sans doute Ritter qui a dû, comme d'autres, essayer logiquement d'approcher un aimant des pôles de la pile, alors que l'effet se produit à l'extérieur, par action sur le fil conjonctif qui joint les deux pôles.

Le mémoire décrit ensuite la pile utilisée, une pile à auges assez puissante, capable de débiter quelques ampères. L'aiguille aimantée se dirige normalement vers le Nord, ou plutôt suivant le méridien magnétique, et alignée avec le fil conjonctif s'il n'est pas branché à la pile. Quand le conflit, le courant, passe dans ce fil,

l'aiguille tend à se mettre presque en croix vers l'Est ou l'Ouest, suivant le sens du courant ou suivant que le fil passe dessus ou dessous l'aiguille (b) :

« La déviation est inversement proportionnelle à la distance du fil à l'aiguille et fonction de la puissance de l'appareil galvanique (la pile)... Il en résulte que l'effet observé ne peut être attribué à une attraction... les forces de ce conflit électrique sont circulaires... le conflit électrique n'est pas enfermé dans le conducteur lui-même, mais dispersé dans son environnement proche... » (1).

Oersted, troublé par cette force circulaire imagine une sorte de tourbillon qui entraînerait l'aiguille aimantée.

Cette force présentait trois anomalies par rapport aux forces à distance connues, les forces électrostatiques, et même la gravitation :

- Un effet provoqué par un fil parcouru par le conflit électrique et non plus des charges électriques statiques ;
- Une interaction entre des phénomènes magnétiques et électriques considérés comme bien distincts par Coulomb et ses prédécesseurs ;
- Une force ne s'exerçant pas comme les attractions newtoniennes, selon la droite qui relie les centres, mais circulaire autour du fil.

Il est probable qu'Oersted a cherché pendant six mois à trouver une explication à cette étrange force. N'y parvenant pas, il s'est décidé à publier son expérience telle quelle, sans explication, au cas où un autre ne le ferait avant lui, car il se doutait qu'il n'était pas le seul sur cette question.

La nouvelle eut bien un fort retentissement dans le petit monde des savants pour deux raisons : le sujet était dans l'air depuis des années, de plus il n'y avait pas eu de découverte électrique marquante depuis vingt ans, si ce n'étaient celles de nouveaux corps simples par l'électrochimie débutante. Peut-être aussi en raison des perturbations internationales provoquées par les guerres napoléoniennes.

La Royal Society décerna la médaille Copley de 1820 à Oersted, l'équivalent à l'époque d'un petit prix Nobel. Mais personne ne comprenait pourquoi l'aiguille aimantée déviait ; on se retrouvait devant une situation analogue à celle de 1786, quand Galvani découvrit un fait surprenant, l'agitation des cuisses de grenouille lors de la décharge d'une machine électrique proche. (I-3)

L'antériorité

Comme nombre de découvertes ou inventions cette déviation de l'aiguille aimantée sous l'effet d'un courant voisin avait été constatée depuis des années, mais restée inconnue. Qu'importe, le second découvreur a autant de mérite que le premier... s'il l'ignorait.

Domenico Romagnesi avait publié à Trente, le 3 août 1802, un mémoire sur cette expérience. Le neveu de Galvani, Giovanni Aldini le signale dans son *Essai théorique et expérimental sur le Galvanisme*, imprimé à Paris en 1804 : « M. Romagnesi, physicien de Trente, a reconnu que le galvanisme faisait décliner l'aiguille aimantée. Joseph Izarn, professeur de physique au lycée Bonaparte, le mentionne aussi dans son *Manuel du galvanisme* de 1805, déposé dans les bibliothèques des lycées de France. Mais aucun professeur n'y prêta attention.

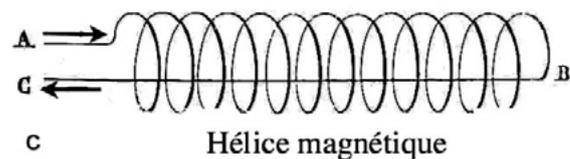
Oersted rencontra Aldini plusieurs fois lors de ses voyages à Paris (1802-1803-1813). Peut-être ce fait ne l'avait pas frappé à l'époque ; c'était alors la pile et ses effets électrochimiques qui intriguaient surtout les savants. Romagnesi avait seulement signalé ce fait étrange, sans chercher à l'expliquer. Oersted ira plus loin en l'analysant plus à fond, mais sans trouver d'explication lui non plus.

Ampère fonde l'électromagnétisme en deux semaines (2)

François Arago expérimentait à Genève chez de La Rive, lorsque arriva la lettre d'Oersted. Avec de Saussure, Pictet et d'autres, il assista à la démonstration dans ce groupe scientifique informel des genevois qui a souvent fait avancer la science électrique. Dès son retour à Paris, il décrit l'expérience vue à Genève, au cours de la séance de l'Institut du 4 septembre 1820 ; il fut alors chargé de la reproduire le lundi suivant.

– **le 11 septembre** se déroule l'expérience. André Marie Ampère est présent. Professeur en analyse mathématique et mécanique à l'école Polytechnique, il ne s'était pas jusque-là intéressé à l'électricité, mais aux mathématiques, à la chimie et à la psychologie. Il saisit immédiatement l'importance des phénomènes dont il vient d'être témoin. Se déclenche dans son cerveau le déclic de l'intuition, qui va se traduire pendant quatre mois par un feu roulant de communications fortes et irréfutables, lors des séances de l'Académie. Il n'y avait pas encore de compte-rendu des séances (0), mais Ampère en a consigné quelques éléments dans ses notes :

– « Séance du **18 septembre** – Je réduisis les phénomènes observés par M. Oersted à deux faits généraux... je décrivis les instruments que je me proposais de faire construire et entre autres des **spiraux et des hélices galvaniques**.

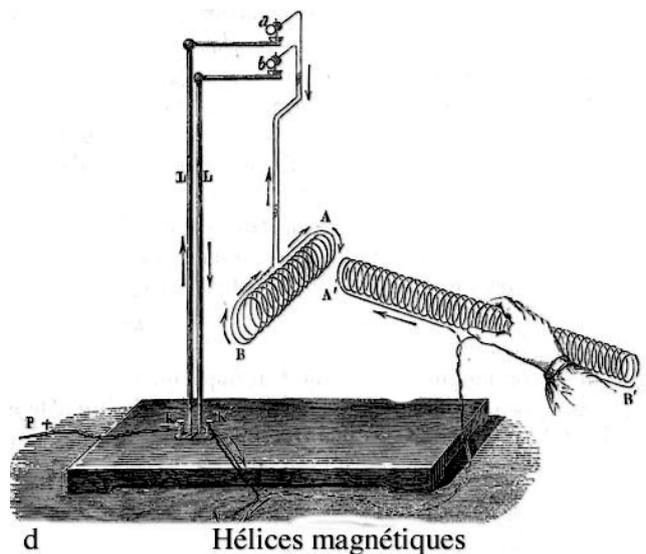


J'annonçais que ces dernières produiraient dans tous les cas, les mêmes effets que les aimants (c). J'entrais ensuite dans quelques détails sur la manière dont je conçois les aimants, comme devant uniquement leurs propriétés à des courants électriques dans des plans perpendiculaires à leur axe et sur les courants semblables que j'admets dans le globe terrestre ; en sorte que **je réduisis tous les phénomènes magnétiques à des effets purement électriques...** »

Une semaine seulement pour présenter le principe de l'électromagnétisme.

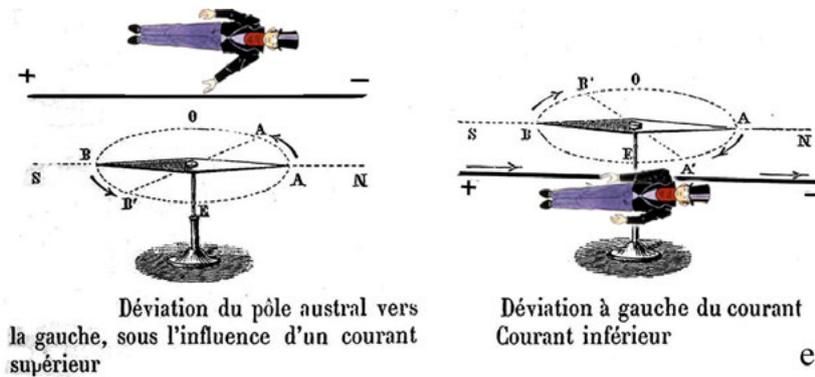
– La séance du **25 septembre** reste mémorable par l'annonce d'un fait assez extraordinaire : « Je donnerais plus de développement à cette théorie, et **j'annonçais le fait nouveau de l'attraction et de la répulsion de deux courants électriques sans l'intermédiaire d'aucun aimant**, fait que j'avais observé sur des conducteurs pliés en spirale. Je répétais cette expérience dans le cours de la séance... » (d).

Si l'on approche d'une hélice stabilisée AB, une autre hélice A'B' on obtient des attractions ou répulsions comme avec des aimants.



Ces phénomènes nécessitaient de raisonner dans l'espace à trois dimensions avec une analogie :

« ... d'après le fait général, que si l'on se place par la pensée dans la direction du courant, de manière qu'il soit dirigé des pieds à la tête de l'observateur, et que celui-ci ait la face tournée vers l'aiguille ; c'est constamment à sa gauche que l'action du courant écartera de sa position ordinaire celle de ses extrémités qui se dirige vers le Nord. C'est ce que j'exprimerais plus brièvement en disant que le pôle austral de l'aiguille (le Nord) est porté à gauche du courant qui agit sur l'aiguille. » (e)



Déviaton du pôle austral vers la gauche, sous l'influence d'un courant supérieur

Déviaton à gauche du courant Courant inférieur

C'était l'acte de naissance d'un personnage resté célèbre dans les lycées, le **Bonhomme d'Ampère**, (14) que l'on remplace souvent par la règle des trois doigts ou celle du tire-bouchon de Maxwell.

En quelques mots simples, clairs et précis, on peut même écrire dans un éclair de génie, il jetait les bases d'une nouvelle

science dénommée plus tard **électromagnétisme**, basé sur la corrélation des phénomènes électriques et magnétiques.

Simultanément il définissait son programme de travail pour démontrer expérimentalement toutes ces notions nouvelles, qu'il exposait d'emblée comme des certitudes. Toutes ses affirmations se vérifieront par l'expérience dans les semaines suivantes, sans aucune correction. Quelle prémonition et rapidité de jugement !

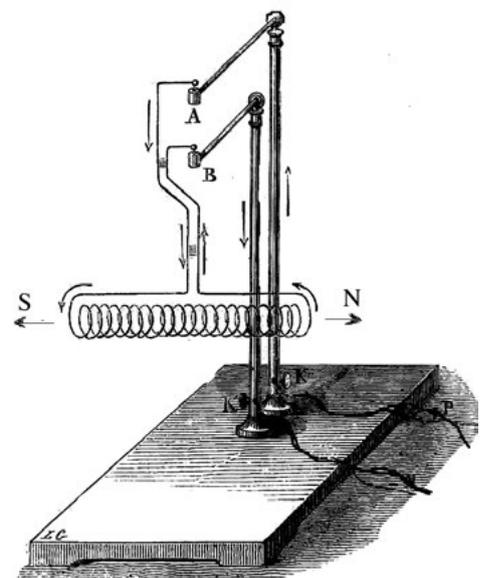
Il était déjà très au-delà de la seule interprétation de l'expérience d'Oersted, à l'aide du petit Bonhomme et la règle d'Ampère. Ampère consacrait toute son énergie et son temps à préciser et tester ses idées par des expériences, et présentait chaque semaine un nouveau mémoire à l'Académie.

– **Le 2 octobre**, il expose le résultat d'une expérience, suggérée par Laplace, sur la déviation d'une aiguille aimantée à grande distance par un courant, l'embryon d'un télégraphe électrique.

– **Le 30 octobre**, il suspendait à des potences une hélice magnétique trempant dans des coupelles de mercure permettant leur pivotement (h). Le courant circulant dans l'hélice va provoquer l'orientation de son "pôle" magnétique vers le nord, c'était une boussole électrique sans aimant.

À la même séance **Biot** présenta la loi donnant la force exercée sur un courant par un petit aimant, elle décroissait avec la distance, comme l'avait constaté Oersted. **Laplace** démontra que la force développée par un aimant sur un élément de courant était en raison inverse du carré de la distance.

– **Le 10 novembre**, son ami Arago apporta une contribution capitale à ce foisonnement d'idées nouvelles que suscitait la théorie d'Ampère. Il avait plongé dans la limaille de fer un fil parcouru par un courant. Si, conformément à la nouvelle théorie, il y avait identité entre le galvanisme et le magnétisme, la limaille devait être attiré comme par un aimant – elle le fut. Arago montra cette expérience à Ampère. Aussitôt celui-ci en tira comme conséquence que, si l'on plaçait une aiguille de fer dans un fil enroulé en spirale, on en ferait un aimant artificiel temporaire, tant que le courant parcourrait le fil (f).



h Hélice magnétique

L'**électro-aimant** était inventé, première application directe des découvertes d'Ampère (g).



f Procédé d'aimantation

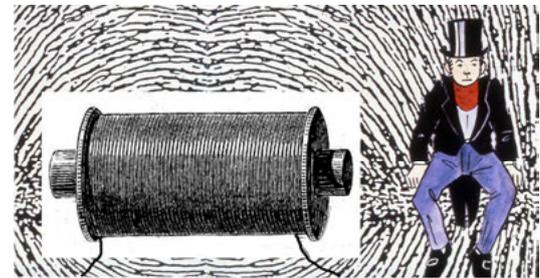
Arago lu son mémoire à l'Académie le 2 avril 1821 ; Notice sur l'aimantation imprimée aux métaux par l'électricité en mouvement. Il précise : « ...En répétant les expériences du physicien danois, j'ai reconnu que ce même courant développe fortement la vertu magnétique dans des lames de fer ou d'acier qui, d'abord, en étaient totalement privés... »

Diverses formes des noyaux en fer de l'électro-aimant, en fer à cheval, avec une palette mobile, seront ensuite perfectionnés par Sturgeon et Henry.

– **Le 4 décembre**, c'est le bouquet final, Ampère présente à l'Académie la formule générale de la force s'exerçant dans l'espace entre deux éléments de courants (j).

Elle définit toutes ces nouvelles actions électromagnétiques à distance, en particulier le fait de l'attraction mutuelle de deux courants de même sens et la répulsion de deux courants de sens contraire.

Cette première formule de l'électricité dynamique, constitue la première loi fondamentale de l'électromagnétisme.



g Electro-aimant simple

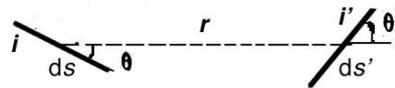
C'est dans le **Mémoire** que je lus à la séance du **4 décembre 1820**, que je communiquai à l'Académie la formule fondamentale de toute la théorie exposée dans ce **Mémoire**, formule qui donne la valeur de l'action mutuelle de deux fils conducteurs exprimée ainsi :

$$\frac{ii' ds ds' (\sin \theta \sin \theta' \cos \omega + k \cos \theta \cos \theta')}{r^2}$$

k étant égal à $-\frac{1}{2}$

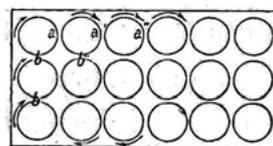
ω étant l'angle du plan de ds et r avec le plan de r et ds'

j



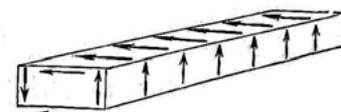
– Aux séances suivantes, jusqu'au **8 janvier 1821**, Ampère apportait des compléments, en particulier son hypothèse sur la constitution magnétique de l'aimant : une série de petits courants autour des *molécules*, existant avant l'aimantation du fer, du nickel ou du cobalt, mais dirigés en tous sens, ne pouvant donc avoir une action commune à l'extérieur. L'aimantation s'opère quand l'action magnétique d'un aimant ou d'un courant proche donne à tous ces courants désordonnés une direction commune (k).

On n'avait plus besoin de l'hypothèse d'un fluide magnétique, tout s'expliquait par la circulation de courants.



k Courants particuliers des aimants

Courants résultants à la surface d'un aimant



– **Le 2 avril 1821** il lit en séance publique à l'Académie une notice d'ensemble que complètera un mémoire récapitulatif, seulement le 8 avril 1822, en raison d'une maladie.

En 1824, il terminera la construction cohérente de toute sa théorie : *Théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience* ; le livre ne fut édité qu'en 1827, mais son contenu avait été en grande partie diffusé dans ses précédents mémoires (4).

Il débute par un long éloge de Newton dont il admirait essentiellement la méthode initiée déjà par Kepler :

« Observer d'abord les faits, en varier les circonstances autant qu'il est possible, accompagner ce premier travail de mesures précises pour en conclure les lois générales uniquement fondées sur l'expérience, et déduire des lois ainsi obtenues, indépendamment de toute hypothèse sur la nature des forces qui produisent les phénomènes, la valeur mathématique de ces forces, c'est-à-dire la formule qui les représente. »

Son titre n'est pas neutre, il précise nettement qu'il formule sa théorie en termes de quantitatif, non pas simplement de qualitatif ; ensuite qu'il élimine toute hypothèse ou spéculation intellectuelle pour ne prendre en compte que des faits expérimentaux reproductibles. L'ensemble est basé sur quatre expériences qu'il dénomme cas d'équilibre, destinées à déterminer les coefficients constants qui entrent dans la formule. Par exemple, il aurait pu adopter d'emblée que les efforts étaient inversement proportionnels au carré de la distance, comme dans les formules de Newton et Coulomb ; au contraire il considère au départ que c'est à une puissance n qu'il détermine expérimentalement pour trouver ensuite $n = 2$, soit le carré.

L'ouvrage est une minutieuse justification de sa théorie, complétée par la réfutation justifiée des nombreuses critiques et contradictions de ses opposants, principalement Biot, cité une dizaine de fois. Par contre, il mentionne l'apport positif de Faraday avec ses expériences de rotation de conducteurs. Le tout est écrit avec une clarté et précision assez rare pour des problèmes aussi complexes et nouveaux à l'époque.

– **Le 16 septembre 1822**, Ampère faisait une simple communication, « *la production des courants électriques par influence* », sur une expérience étrange qu'il ne chercha pas à expliquer : lorsqu'on approche un électroaimant en fer à cheval d'une lame de cuivre, celle-ci peut être attirée ou repoussée suivant la direction du courant. Il en conclut qu'un courant électrique excite de l'électricité dans les corps conducteurs près desquels il est dépassé.

À la même époque, il avait réalisé à Genève, avec de La Rive, une autre expérience où se manifestait par hasard un courant induit, qu'ils n'ont pas cherché à comprendre. Cela n'intrigua personne, même pas Arago qui révélait deux ans plus tard le magnétisme de rotation, phénomène d'induction très proche ; ni Faraday qui découvrait l'induction, cause du phénomène, seulement neuf ans plus tard. (I-5)

La découverte est vraiment une étrange déesse dont la beauté fugitive reste souvent invisible aux yeux des chercheurs préoccupés par d'autres soucis.

Le processus intellectuel de la découverte

Il est généralement difficile de comprendre comment a fonctionné le cerveau du découvreur, intuition ou raisonnement logique ? Celui d'Ampère a été décrit par lui-même :

– seul un aimant peut attirer un autre aimant, donc le fil parcouru par le fluide électrique est un aimant. Affirmation de pure logique, mais étrange. Aucun rapport physique n'apparaît entre un aimant et un fil ;

– mais la force qu'il exerce n'est pas une interaction suivant une droite, elle est circulaire autour du fil ;

– alors si le fil est mis en boucle, en forme de spirale, elle doit se concentrer en son centre, prémonition osée que l'expérience confirme ;

– Il suffit alors d'ajouter l'effet de plusieurs spirales côte à côte formant une hélice, qui devient un additionneur, sorte d'amplificateur de force magnétique. Cela devient un aimant électrique dont l'axe

porte un pôle plus d'un côté, moins de l'autre, donc une bobine d'électroaimant, dénommée plus tard un solénoïde (7).

Aujourd'hui, on n'imagine guère d'appareil électrique sans bobines, ces milliards de solénoïdes d'Ampère, concentrateurs de magnétisme.

En comparaison avec d'autres découvertes, cette fondation de l'électromagnétisme par Ampère n'avait nécessité aucune intervention du hasard, si ce n'est peut-être la découverte d'Oersted elle-même, qui était dans l'air du temps. Ampère en effet n'a jamais pris en compte le hasard, pourtant à l'origine de multiples découvertes. Cette carence intellectuelle lui fera d'ailleurs manquer de peu celle de l'induction, le 16 septembre, et une seconde fois avec de la Rive. Un manque caractéristique de *sérendipité*, heureusement compensé par d'autres aptitudes.

Le plus stupéfiant fut la rapidité de la découverte et du calcul de cette force électromagnétique, moins de 3 mois, chaque fait ou concept était présenté dans sa forme définitive, sans nécessiter de compléments ultérieurs, sans considérations philosophiques sur les causes. Une étonnante intelligence précise, rapide, sans hésitations ; mais avec pourtant une carence notable, ne pas savoir interpréter le hasard fugitif, cet ange gardien du découvreur.

Les contradicteurs

Comme il arrive souvent à l'apparition d'une nouvelle théorie surprenante, les savants se divisaient en trois groupes : les suiveurs enthousiastes, les contradicteurs de bonne foi ou simplement jaloux, et enfin ceux qui se rappelaient soudain avoir eut des idées analogues.

En France, se rallièrent immédiatement à cette approche totalement nouvelle : Arago, Fresnel, Fourier, Savary, plus tard Becquerel. Les opposants étaient les mathématiciens, Laplace et surtout Biot qui prônait, à l'inverse d'Ampère, que l'action du courant ne servait qu'à "imprimer une certaine aimantation" aux métaux qu'il traverse, ils étaient entourés de minuscules aimants. Il fit preuve longtemps d'une mauvaise foi, à la limite de la bêtise, dommage pour un bon mathématicien.

On trouvait aussi surprenant qu'en électrostatique, les corps chargés d'électricité de même signe se repoussaient, alors qu'Ampère montrait que les courants de même sens s'attiraient. (5) De même, dans les théories de Newton, les forces d'actions et réactions s'exercent suivant une ligne droite. Ampère démontrait alors que les rotations résultaient d'attractions et répulsions directes.

À l'étranger, les anglais étaient déconcertés, peu entraînés aux raisonnements à base de mathématiques. Berzélius ignore Ampère. Il a fallu convaincre difficilement Wollaston, Davy, Faraday, Prévot, Nobili à Bologne. Ampère répondait à leurs critiques par des lettres claires et détaillées ; Babbage, venu de Londres pour rencontrer Ampère, était reparti convaincu par les expériences et son discours précis et bien étayé. Il entraîna à son retour une meilleure compréhension de la nouvelle théorie par les anglais, considérés comme les références dans cette science électrique naissante.

Apports théoriques

Ils dépassent très largement la simple explication de l'expérience d'Oersted avec le petit bonhomme au bras tendu :

1 - Ampère affirme et démontre expérimentalement qu'un courant électrique se comporte dans son environnement comme un aimant. Son apport majeur est l'explication de tous les phénomènes magnétiques par l'action externe des courants électriques. Le magnétisme seul n'existe pas, ce n'est que l'un des effets de l'électricité dans son environnement.

C'est l'**acte fondateur de l'électromagnétisme**, qu'il dénommera électrodynamique, concept totalement nouveau, que nombre de physiciens et mathématiciens approfondiront jusqu'à la première synthèse de Maxwell en 1864, suivi des Lorentz, Langevin, Einstein, Bohr, au début du *xx*^e.

2 - Symétriquement, il explique l'effet d'un aimant comme la résultante de l'action magnétique d'une infinité de petits courants circulaires, tournant autour des *molécules* ; grains élémentaires de matière à l'époque. Invérifiable à l'époque, cette hypothèse guida les recherches de Weber, Maxwell et Ewing et ne fut confirmée qu'au XX^e siècle.

De même pour la terre, un aimant d'après Gilbert en 1600, Ampère attribue son effet magnétique à de forts courants internes, générés par l'*effet dynamo*, explication proposée seulement en 1947 par Walter Elsasser.

Bien avant, en 1822, Leopoldo Nobili avait réalisé un globe terrestre complètement ceinturé d'un fil électrique (1), reproduisant le magnétisme terrestre, d'après Ampère, quand un courant y circulait. On le détectait avec une petite aiguille aimantée placée sur un support extérieur (disparu). Cette terrella du Museo galileo de Florence est plus connue sous le nom de Barlow globe, lequel la présenta à la Royal Institution en 1824.

3 - L'électromagnétisme d'Ampère reposait d'abord sur la force d'interaction de deux courants proches, dont il détermina la formule valable dans toutes les dispositions relatives de conducteurs dans les trois dimensions de l'espace. Il en résultait les cas particuliers de l'attraction de deux courants parallèles de même sens et la répulsion entre courants de sens contraires. Il était alors possible de provoquer un mouvement de rotation permanent de l'un des conducteurs à une vitesse limitée seulement par les frottements.

Dans sa note de candidature au Collège de France il précisait : « La marche qui m'a conduit à cette formule sera toujours un modèle de celle qu'on doit suivre pour arriver à de telles formules par l'expérience seulement et sans aucune supposition... »

Quarante ans plus tard, Maxwell écrira : « L'étude expérimentale par laquelle Ampère a établi les lois de l'action mécanique qui s'exerce entre les courants électriques constitue l'un des plus brillants exploits de la science. Il semble que cet ensemble de théorie et d'expérience ait jailli dans toute sa puissance, avec toutes ses armes, du cerveau du Newton de l'électricité. La forme en est parfaite, la rigueur inattaquable et le tout se résume en une formule, d'où peuvent se déduire tous les phénomènes et qui devra toujours rester la formule fondamentale de l'électrodynamique. »



1 Terrella de Nobili

Formule de Laplace. — Laplace, en appliquant le calcul à ces lois, a trouvé que l'action exercée par un élément de courant sur un pôle magnétique varie *en raison inverse du carré de la distance et proportionnellement au sinus de l'angle* que fait, avec la direction du courant, la ligne qui joint son centre au pôle magnétique. Cette force est appliquée à l'élément du courant, perpendiculairement au plan déterminé par l'élément et le pôle, et elle est dirigée conformément à la règle

$$f = \frac{\mu I \lambda}{r^2} \sin \omega$$

d'Ampère. La loi élémentaire est exprimée par la formule dans laquelle *f* représente l'*action élémentaire*, *I* l'intensité du courant et *λ* sa longueur, *μ* la masse magnétique du pôle, *r* sa distance et *ω* l'angle de l'élément avec la ligne NO.

Physique A. Ganot 1868

Cette formule générale de la force d'Ampère n'est plus utilisée, peut-être en raison de son calcul un peu compliqué ; on lui préfère maintenant une autre formule, moins générale, simplifiée par Laplace (m), mais qui, à l'origine, faisait intervenir le moment ou masse magnétique d'un aimant.

Cette formule de Laplace fut simplifiée plus tard par Neumann, en remplaçant ce moment difficile à calculer, par le champ magnétique, soit le moment divisé par le carré de la distance *r*. Moins générale que celle

d'Ampère, elle suppose un champ magnétique uniforme, un conducteur rectiligne et donne la force totale appliquée au milieu du courant. Elle pourrait s'appeler formule d'Ampère-Laplace-Neumann (6).

4 - La mécanique nous apprend qu'une force appliquée à un corps le met en mouvement avec production d'énergie. **Le principe du moteur électrique**, attractions et répulsions entre conducteurs, était donc acquis. D'où les premières expériences de déplacement et rotations de conducteurs ou d'aimants. Tous les moteurs à venir fonctionneront avec les forces d'Ampère entre conducteurs et ce qui revient au même, depuis Ampère, entre conducteurs et champs d'électroaimants.

5 - Comme le fait remarquer Emile Bauer, Ampère est conduit à utiliser dans sa théorie apparemment newtonienne la notion de champ magnétique, du moins comme grandeur auxiliaire. Pour calculer avec sa formule l'action d'un circuit fermé sur un élément de courant, Ampère est obligé d'intégrer sa loi d'action à tout le circuit considéré. Ceci le conduit à introduire une grandeur nouvelle dont il se sert régulièrement : **la directrice des actions électro-dynamiques** au point occupé par l'élément, qui n'est pas autre chose, pour nous, que le champ magnétique du circuit parcouru par un courant d'intensité égale à l'unité.

C'est précisément un vecteur, dont les composantes sur les trois axes A, B, C (p. 157) sont toujours utilisées aujourd'hui, mais le calcul vectoriel ne naîtra que plus tard.

L'étape suivante sera l'abandon officiel par Faraday de l'action à distance de Newton, remplacée qualitativement par les lignes de force du champ, en attendant que Maxwell quantifie mathématiquement ce champ.

Mais déjà Ampère avait prévu qu'il faudrait imaginer un milieu déformable pour assurer la propagation des actions : « Je ne doute pas que les attractions et répulsions des courants électriques ne soient le résultat des mouvements du fluide qui remplit l'espace. » Faraday envisagera aussi cet **éther**, que Maxwell adoptera, mais avec des réserves sur sa nature.

6- En fondant les bases d'une nouvelle science électrique, Ampère, en mathématicien clair et précis, en a même défini le vocabulaire électrique qui nous est familier :

Le fil conjonctif devient un simple **conducteur**, qui conduit non pas le fluide ou conflit électrique, mais **le courant**. À la séance du 30 octobre, Ampère avait lu un mémoire qui contient plusieurs définitions et termes s'ajoutant à la force électromotrice de Volta : « **L'action électro-motrice** se manifeste par deux sortes d'effets que je crois devoir distinguer par une définition précise. J'appellerai **le premier tension électrique, le second courant électrique**. Le premier s'observe lorsque les deux corps entre lesquels cette action électromotrice a lieu sont séparés par des corps non-conducteurs, le second est celui où ils font, au contraire, partie d'un circuit de corps conducteurs qui les font communiquer... »

« Je sous-entend après les mots, **sens du courant électrique**, ceux-ci : de l'électricité positive... » Choix arbitraire (?) entre les deux électricités censées circuler en sens contraire.

Plus tard, il désignera cette *énergie du courant* par le terme **intensité**. Lorsque l'unité de mesure de l'intensité deviendra l'ampère, en 1881, l'appareil de mesure deviendra l'ampèremètre, le terme galvanomètre, proposé par Ampère sera conservé pour les appareils précis de laboratoire. (8) (9) (10)

Il est à remarquer qu'Ampère ne chercha pas à approfondir la nature même de l'électricité par des spéculations intellectuelles. Il lui suffisait de comprendre ses effets par des expériences, puis d'en définir les lois. Ce ne fut pas nécessaire au développement des multiples applications de l'électricité jusqu'à la fin du siècle. Nous exploitons bien les lois de la gravitation dans notre quotidien, comme pour lancer des satellites, sans connaître la nature de ce champ, ni son mode d'action. Peut-être le graviton ?

Les expériences

À l'exception des hypothèses, invérifiables à l'époque, sur le magnétisme des aimants et celui de la terre, toutes les conséquences de la nouvelle théorie ont fait l'objet de vérifications expérimentales soignées. Elles ont contraint Ampère et ses contemporains à concevoir de curieux montages de fils mobiles, suspendus sur des cuvettes remplies de mercure destinées à assurer le passage du courant, sans perturber le mouvement du circuit. La reproduction de la planche I du livre (début du chapitre) en donne une idée, un travail de bricoleur ingénieux dont l'établi de travail était une simple table (n) dont l'original est présenté au Deutsches Muséum de Munich et une copie au Musée Ampère de Poleymieux.

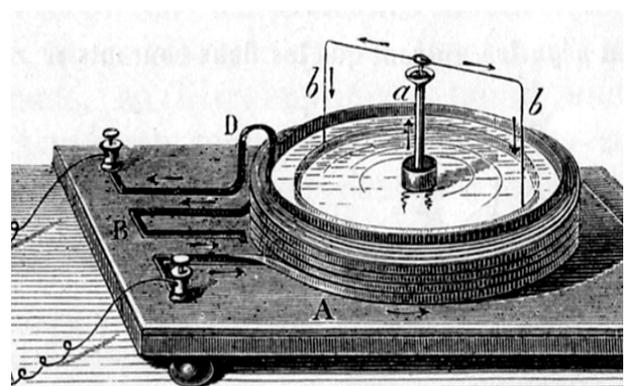
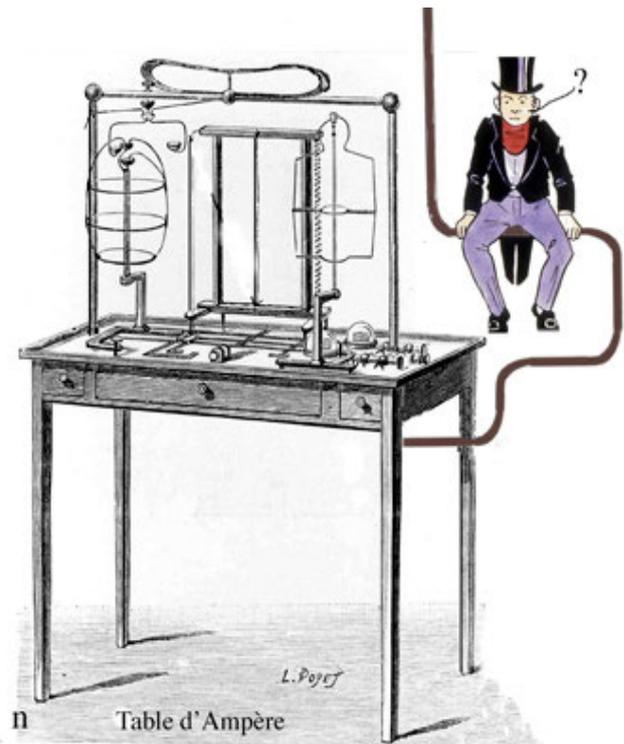
L'une des expériences de base était celle de l'hélice magnétique suspendue dans des coupelles de mercure A et B permettant son pivotement (h ci-dessus). Le courant qui la traversait provoquait son orientation vers le Nord ou le Sud suivant son sens; c'était une boussole électrique. Quelques physiciens se rendirent dans le modeste cabinet de la rue des Fossés Saint Victor, pour constater que des marins sans boussole pourraient se diriger avec de simples fils électriques ... s'ils avaient une pile ! La terre n'est donc pas un aimant, mais une énorme pile faisant circuler des courants dans sa matière. Si l'on approchait une autre hélice, (d ci-dessus) on obtenait des attractions ou répulsions comme avec des aimants.

Les actions électromagnétiques d'Ampère étaient des forces transversales provoquant naturellement des rotations, ainsi le montage (o) une bobine entourant une coupe de mercure permet de faire tourner un cadre de conducteurs.

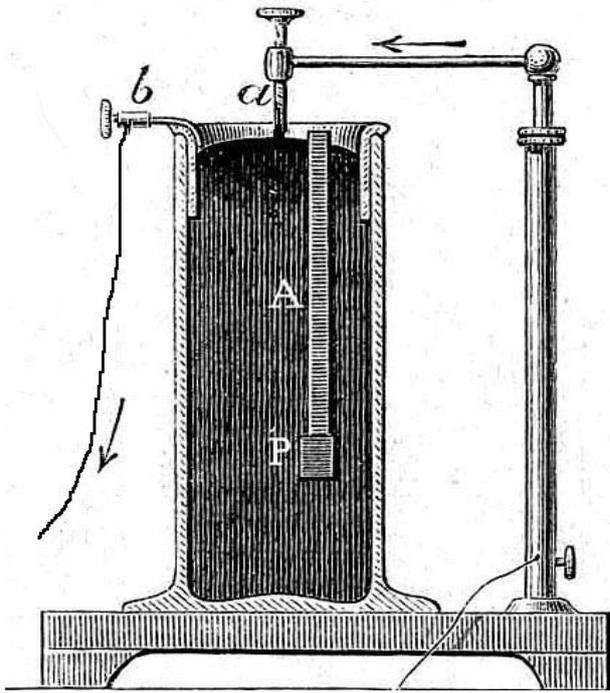
Ce fut l'occasion pour le jeune assistant de Davy, Michael Faraday, de débiter en novembre 1821 sur la scène électrique par diverses expériences. Wollaston lui avait suggéré la mise en rotation d'un cadre par un aimant central (p), lequel remplaçait la bobine de l'expérience précédente.

Il réussit également à faire tourner un aimant parallèlement autour d'un conducteur parcouru par un courant (q) ; mais n'arrivait pas à faire tourner réciproquement cet aimant sur son axe. Ampère lui indiqua le défaut du montage dans une correspondance (conservée au Musée) et il obtint cette rotation (r).

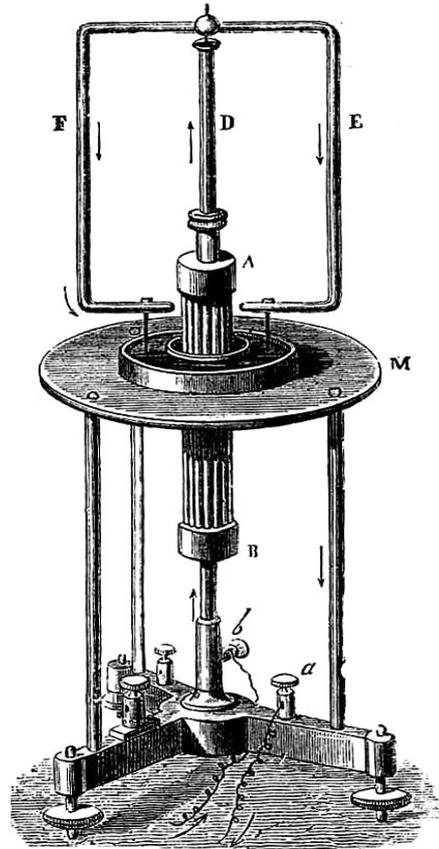
L'Anglais Roget imagina l'appareil (s) pour montrer l'attraction des spires d'un solénoïde. Le courant parcourt le solénoïde lorsque son extrémité trempe dans la cuvette de mercure, aussitôt les spires se rapprochent et le contact est coupé ; les spires reviennent au repos et le contact rétablit le courant. Il en résulte une oscillation permanente du système comme un ressort qui est comprimé puis relâché indéfiniment.



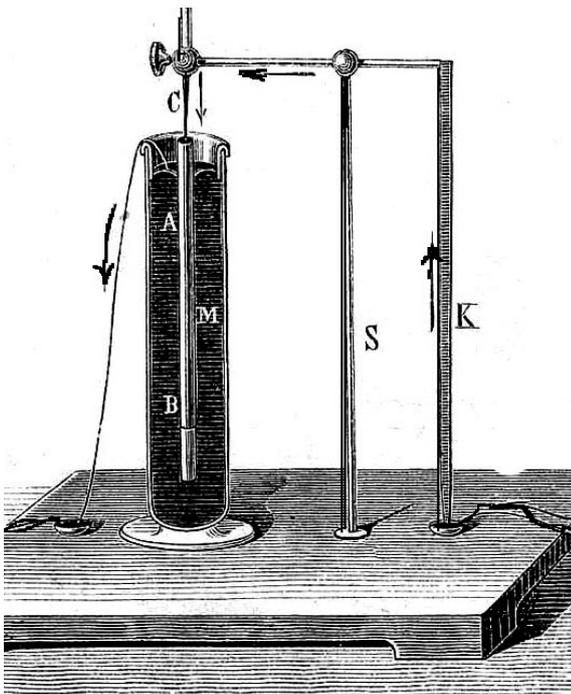
o rotation d'un cadre conducteur



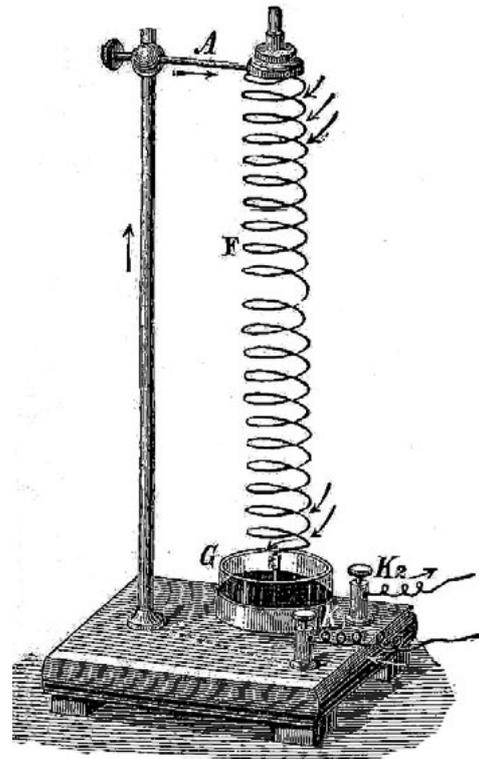
q rotation d'un aimant A sous l'action d'un courant



p rotation par aimant axial



r Rotation axiale d'un aimant



S Roget's Contact-breaker.

L'appareil le plus connu, illustrant les rotations électromagnétiques, est cette roue imaginée par Peter Barlow en 1822 (t). Les dents trempent dans le mercure contenu dans un creux du socle et relié à une borne B d'arrivée du courant depuis une pile. À la fermeture du circuit, la roue tourne sous l'effet du champ magnétique développé par l'aimant. Le sens de rotation change si l'on inverse celui du courant ou les pôles de l'aimant.

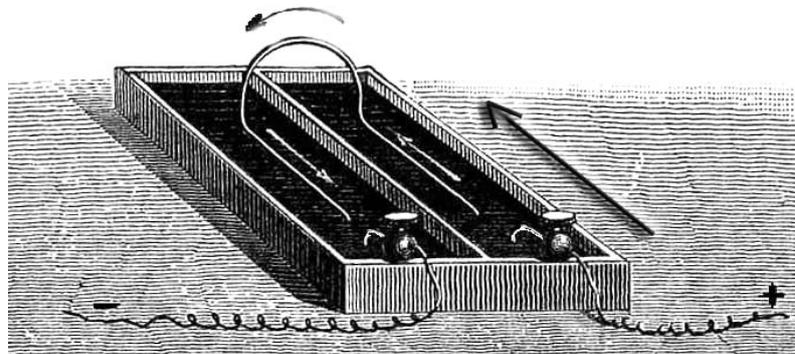
Même sans aimant la roue tourne, mais plus lentement, sous le seul effet des conducteurs d'amenée du courant sur le rayon de la roue trempant dans le mercure ; c'est d'ailleurs sous cette forme que Barlow l'a conçu primitivement (11); l'aimant a été ajouté ensuite par William Sturgeon.

L'appareil transformant l'énergie du courant en travail mécanique de rotation illustre le **principe d'un premier moteur rotatif utilisant la force d'Ampère**.



t Roue de Barlow

Dans son livre (p.28) Ampère explique comment sa formule (j) prévoit que deux éléments de courant d'un même conducteur rectiligne se repoussent mutuellement avec une force finie en i^2/r^2 , les angles θ, θ' et ω de la formule étant nuls dans ce cas. Pour vérifier l'existence de cette **force longitudinale de répulsion**, il avait conçu l'expérience fig.8 de sa planche I, reproduite en début de chapitre.



u Répulsion des parties consécutives d'un même courant

Dans ce montage (u), sur une cuve de mercure séparée par une cloison, flotte un conducteur en U dont chaque branche isolée par de la soie, sauf l'extrémité libre s'éloigne du fil fixe d'alimentation sous l'effet, d'après Ampère, de la répulsion mutuelle par cette force, des éléments de conducteurs en mercure.

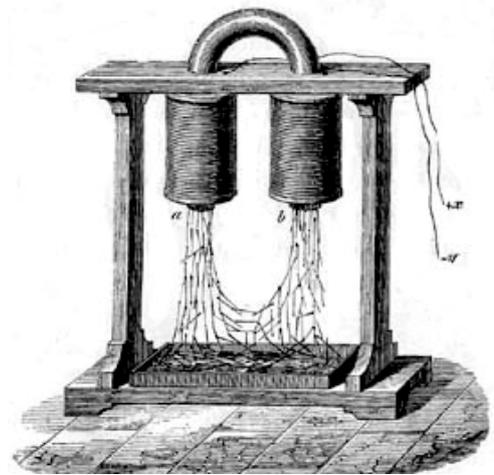
On s'aperçut que, dans ce montage, le déplacement pouvait aussi s'expliquer par la force exercée sur le cavalier par les conducteurs parallèles. L'expérience ne démontre donc pas que la force longitudinale existe, puisqu'une autre s'y ajoute et Ampère ne s'en serait pas aperçu, ce qui est surprenant, compte tenu de la rigueur de ses raisonnements.

Mais la démonstration expérimentale qu'elle n'existe pas, reste encore aujourd'hui en suspens, car des faits assez troublants pourraient la justifier. Il s'agit apparemment d'une impasse technique et historique (12).

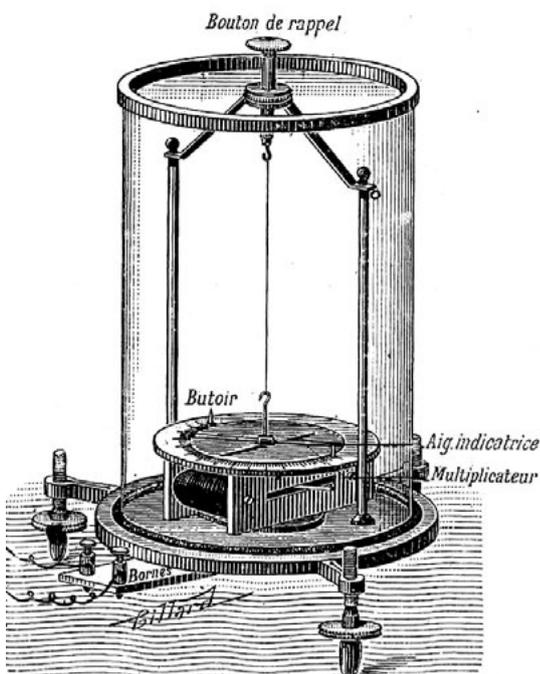
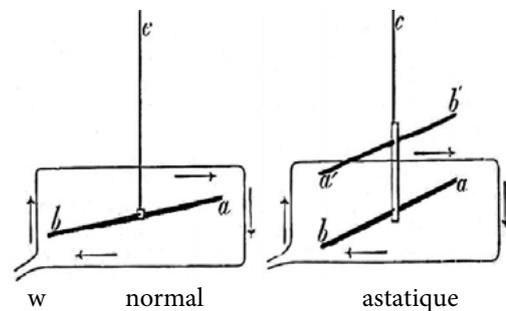
Les applications

La plus remarquable fut celle de **l'électroaimant**, premier dispositif pour produire de l'énergie mécanique à partir de la circulation d'un courant, c'est-à-dire un moteur ou plus simplement un actionneur, capable d'effectuer une seule manœuvre à distance. Il deviendra l'élément de base des premiers moteurs, du télégraphe et de la télé mécanique et mille autres applications (v).

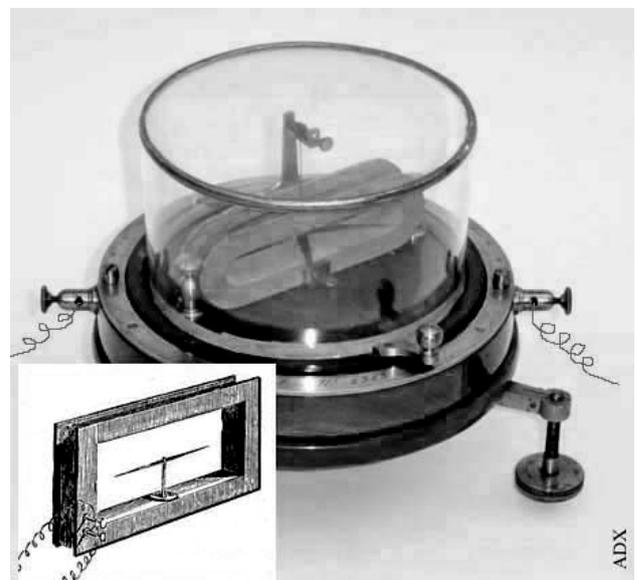
Le **galvanomètre** devint le premier appareil de mesure de l'intensité, cette nouvelle grandeur électrique, en utilisant la déviation d'une aiguille aimantée sous l'effet du courant passant dans une boucle de conducteur proche. Pour renforcer l'effet, l'aiguille suspendue à un fil de torsion, comme dans la balance de Coulomb, est placée au centre d'un cadre rectangulaire, mais Ampère avait remarqué que dans l'expérience d'Oersted, l'aiguille n'arrivait pas à se diriger totalement en croix avec le conducteur, en raison du champ terrestre. Il imagina alors de solidariser deux aiguilles aimantées identiques en sens inverse, d'en placer une à l'extérieur du cadre, l'autre à l'intérieur (w). Ce montage astatique rendait l'ensemble insensible au magnétisme terrestre (13).



v Electro-aimant



y galvanomètre de Nobili



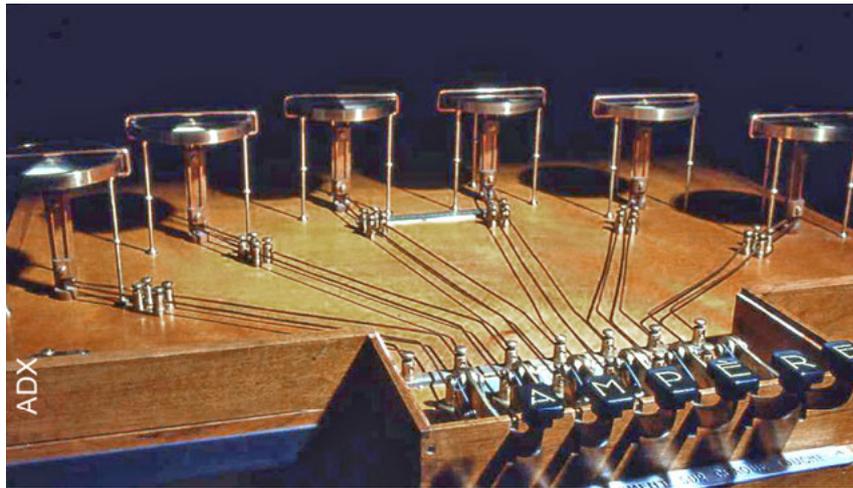
X multiplicateur de Schweigger - Bréguet

Un perfectionnement notable fut aussitôt apporté par Schweigger qui inventa le multiplicateur, c'est-à-dire un cadre sur lequel sont enroulées plusieurs spires au lieu d'une, amplifiant d'autant l'effet sur l'aiguille pour la mesure de faibles courants (x).

Nobili donna au galvanomètre, en 1825, sa forme pratique (y). L'appareil devint indispensable aux électriciens, en particulier pour la grande découverte qui allait suivre, l'induction par Faraday.

Ampère proposait aussi, dans son mémoire du 2 octobre 1820, une application dont le monde rêvait depuis des millénaires, la transmission de l'information à distance, grâce à l'électricité, le télégraphe. Mais le procédé était peu pratique et Ampère n'était pas intéressé par l'application de ses découvertes.

On fermait à la main un circuit électrique au bout duquel une aiguille aimantée déviait, mais il y faudrait autant de circuits que de lettres ou signes à transmettre. Sur la maquette construite par le musée (z), les 6 lettres du mot ampère nécessitent 12 fils, en fait 7 suffiraient. Schilling, puis Cooke et Wheatstone les réduisirent à 5 puis 3 dans le premier télégraphe opérationnel qui fonctionnera en 1836. (V-1)



Z

Télégraphe d'Ampère

Epilogue

Durant ces quatre années consacrées à l'électricité, Ampère vivait encore dans des conditions matérielles difficiles avec des postes peu rémunérés de professeur à Polytechnique et inspecteur général de l'université. Il parvient après quelques péripéties à être élu professeur de Physique au Collège de France, rémunéré 5000 F, mieux que ses postes précédents qui ne l'intéressaient pas. Il retourna vers d'autres domaines de recherches et concluait :

« Les époques où l'on a ramené à un principe unique des phénomènes considérés auparavant comme dus à des causes différentes ont été presque toujours accompagnées de la découverte d'un très grand nombre de faits nouveaux, parce qu'une nouvelle manière de concevoir les causes suggère une multitude d'expériences à tenter, d'explications à vérifier. »

L'avenir proche ne lui donna que trop raison, le XX^e siècle encore plus !

Après le complément essentiel qu'apportera Faraday avec l'induction, commenceront l'élaboration des multiples applications de l'électricité.

Ampère, comme Faraday plus tard et d'autres, cherchait ce Saint Graal des physiciens, l'unification des forces de l'univers et leur origine commune. A son époque, on recherchait en particulier à unifier la chaleur, l'électricité galvanique et la lumière (15).

Aussi, il a dû être particulièrement heureux, après juste deux semaines de réflexions et quelques expériences rapides, de proposer la première unification de deux phénomènes physiques, l'identité du magnétisme et de l'électricité, dénommée plus tard électromagnétisme.

Dans le même domaine électrique, Maxwell annoncera l'identité du champ électromagnétique et de la lumière, mais la vérification par Hertz attendra 20 ans.

Ensuite, avec Einstein, ce sera l'équivalence matière et énergie et les deux applications qui suivirent, la bombe et l'énergie nucléaire.

Aujourd'hui, ce serait le boson de Higgs, une satisfaction intellectuelle pour les savants, ou une vie meilleure pour une humanité en croissance numérique incontrôlée ?

Compléments

0 - La publication des **Comptes-rendus de l'Académie** des sciences de Paris ne fut instituée qu'en 1835 sous l'impulsion d'Arago. Précédemment, il n'y avait qu'un journal, l'Institut, qui ne donnait que les ordres du jour. Les carnets d'Ampère sont les seuls documents relatant ces séances. Une partie était consignée ensuite dans les Annales de physique.

1 - La notion intuitive de **champ magnétique** « ... dans l'environnement proche ... » apparaît déjà dans le texte d'Oersted. Ampère, évitera de lui donner un autre nom que celui de directrice des efforts, car il apparaissait inévitablement dans ses calculs. Il était primordial de prouver à ses contradicteurs que les actions entre courants pouvaient s'exprimer comme des forces newtoniennes, suivant la droite joignant les centres des masses. Ce n'était vrai que si l'on considérait les éléments en interaction comme des infiniment petits. Il exploita ce subterfuge grâce à son aisance dans la formulation mathématique, avec ce calcul infinitésimal, imaginé par Newton puis codifié par Leibniz.

Même s'il avait l'intuition de ce champ, se manifestant dans l'espace environnant le conducteur, Ampère voulait rester dans le dogme consacré des forces newtoniennes pour ne pas bousculer encore plus ses contradicteurs, en particulier les mathématiciens Laplace et Biot.

2 - Le terme d'**électromagnétisme** a été employé ci-dessus alors qu'Ampère n'en voulait pas, ayant démontré que tous les phénomènes magnétiques découlaient de la circulation de courants électriques. Il avait créé le terme d'**électrodynamique** pour exclure le magnétisme même du vocabulaire de son traité (p.97). Un peu l'équivalent de l'électrocinétique pour la circulation du courant dans les conducteurs.

Mais il faudra bien y revenir pour désigner les machines magnétoélectriques qui avaient un aimant permanent comme inducteur. Surtout quand Maxwell montrera la dualité des deux champs électriques et magnétiques, indissociables dans ces ondes électromagnétiques,

3 - Le terme de **champ** (field) n'apparut que beaucoup plus tard, dans le Traité de Maxwell, mais il paraît plus clair de l'utiliser pour la description de l'ensemble des phénomènes découverts par Oersted et Ampère, conséquences pour nous, de l'existence du champ magnétique créé par un courant.

On peut définir le champ, comme la modification de l'espace environnant, provoquant une action spécifique sur une particule déterminée. Le premier champ découvert, mais pas encore défini comme tel à l'époque, était le champ de gravitation de Newton. On se contentait à l'époque d'évoquer seulement l'action à distance entre les masses qui en résultait.

La notion de champ électrique était déjà intuitive au temps de l'électrostatique pour expliquer le phénomène d'induction à distance.

Le champ magnétique fut de même implicite chez Ampère. Les lignes de forces de Faraday en furent une approche plus concrète, elles impliquaient la nécessité d'un milieu pour s'y développer, l'éther.

Ces champs sont liés à des phénomènes statiques, mais lorsqu'ils deviennent variables, suite à un mouvement, Maxwell a montré qu'ils deviennent interdépendants dans le champ électromagnétique. Question développée par Poincaré, de Broglie et autres.

4 - Le **livre d'Ampère** avait été réédité en 1883 chez Hermann, réédité en 1958 à la Librairie scientifique Albert Blanchard, puis aux éditions Jacques Gabay en 1990. Il n'est pas totalement bâti sur l'expérience comme l'affirme le titre, puisqu'il repose sur le postulat newtonien de l'égalité de l'action et la réaction. De même la transmission instantanée de la force électrodynamique a été remise en question par la propagation du champ dans l'espace environnant.

Ce livre ainsi que les différents mémoires de 1820 à 1834 sont accessibles sur l'URL gallica.bnf.fr

5- Une objection embarrassait Ampère :

D'après ses contradicteurs : Deux corps qui, séparément, ont la propriété d'agir sur un troisième, ne sauraient manquer d'agir l'un sur l'autre. Les fils conjonctifs de la pile agissent sur l'aiguille

aimantée (Oersted), deux fils conjonctifs doivent alors s'influencer réciproquement (Ampère), donc les mouvements d'attraction ou répulsion qu'ils éprouvent sont des conséquences nécessaires de l'expérience d'Oersted. Ainsi on a tort de considérer les observations d'Ampère comme des faits primordiaux ouvrant des voies totalement nouvelles

Ampère répondait en défiant ses contradicteurs, Biot en particulier, de déduire des expériences d'Oersted le sens de l'action mutuelle de deux courants, lorsque Arago leur posa ce dilemme « Voici deux clefs en fer, chacune d'elle attire cette boussole, prouvez que ces clés proches s'attirent ou se repoussent, sinon le point de départ de toutes vos objections est faux ».

Dès ce moment, ajoute Arago, les objections furent abandonnées et les forces réciproques des courants prirent définitivement la place qui leur revenait parmi les plus grandes découvertes de la physique moderne. La conséquence première en était la possibilité d'obtenir un mouvement mécanique, le moteur électrique.

6 - Dans les traités de physique et manuels actuels la **formule de Laplace** est exprimée avec la notation vectorielle qui s'est généralisé après 1950 : $\underline{F} = I \times \underline{B}$. Plus récemment, on déduit cette force de Laplace de la force de Lorentz s'exerçant sur une charge q se déplaçant à la vitesse v . Il aurait été plus exact de dénommer cette formule d'Ampère – Neumann – Laplace – Lorentz, ou simplement par le nom de force d'Ampère, comme on le fait pour les 20 équations de Maxwell, transformées en 4 équations par son successeur Heaviside, regroupant les résultats d'Ampère, Gauss et Faraday.

7 - Le terme de **solénoïde**, créé plus tard, probablement par Ampère, vient du grec : solen signifie tuyau et oïdos, en forme de.

8 - Ampère dénommait aussi **galvanomètre**, l'appareil de mesure de l'intensité « L'électromètre ordinaire indique quand il y a tension et la force de cette tension ; il manquait un instrument qui fit connaître la présence du courant électrique dans un conducteur, qui en indiqua l'énergie et la direction. Cet instrument existe aujourd'hui... Il suffit de placer une aiguille aimantée, une boussole, sur le conducteur placé horizontalement dans la direction du méridien magnétique. Je pense que pour distinguer cet appareil de l'électromètre ordinaire, on doit lui donner le nom de galvanomètre. Cet appareil donne l'énergie du courant (l'intensité) par l'angle de déviation de l'aiguille et aussi sa direction... »

9- **L'ampère**, unité d'intensité du courant depuis 1881, a été adopté en 1960 comme unité de base de l'électromagnétisme, l'une des 7 unités fondamentales du système international d'unités (SI). L'ampère a été défini en 1948 comme l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à un mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à

$$2 \cdot 10^{-7} \text{ newton par mètre de longueur.}$$

10 - Ampère fut l'un des assez rares physiciens dominant très bien les outils mathématiques pour les appliquer à la physique. Sans trop dépasser l'objectif de ce livre, il faut seulement évoquer des apports théoriques toujours utilisés en électrotechnique : le **théorème d'Ampère**, dans la forme que lui a donnée ensuite Lord Kelvin, que l'on démontre avec le concept de feuillet magnétique équivalent d'un courant fermé. Ce concept avait été initié par Ampère, mais sans lui donner ce nom.

11 - BARLOW PETER, *A curious electromagnete experiment, Philosoph. Magazine*, t. LXI, 1822.

12 - Cette **force longitudinale** ou axiale, déduite mathématiquement de la formule d'Ampère dans un cas particulier, serait une erreur ? Cette formule générale serait erronée, alors que celle de Laplace reposant sur plus d'hypothèses serait juste ? Étrange ! On comprend mal qu'Ampère se soit trompé, lui qui n'a commis aucune erreur dans ses expériences, démonstrations et calculs. Ce serait la seule.

Les physiciens de la fin du XIX^e considéraient que cette force ne pouvait exister puisqu'elle n'apparaît pas en utilisant la formule de Laplace, basée sur le champ magnétique depuis l'interprétation de Neumann. Comme l'expérience d'Ampère ne permet pas de conclure sur son existence, la rigueur scientifique impose que l'on prouve expérimentalement son existence ou son absence. Vérification

toujours restée en attente, car rares seraient les chercheurs qui oseraient jouer ainsi les iconoclastes, en révélant une faille dans l'électromagnétisme d'après Ampère. Peut-être cette différence résulte-t-elle de ce que la formule d'Ampère est générale, celle de Laplace se limite à un champ magnétique uniforme et une force résultante de forces élémentaires. Son application élimine alors toute force longitudinale.

Précisément, en étudiant à une époque les efforts électrodynamiques dans les installations électriques et l'appareillage, j'avais procédé à des essais de forts courants (100 000 A eff, soit 240 000 A instantanés), traversant des contacts solides et constaté des forces élevées longitudinales de répulsions, inexplicables avec la loi de Laplace ou autres phénomènes thermiques.

De même, lorsque l'on examine dans un fusible moyenne tension, long de 20 cm, la trace de fusion du fil d'argent dans le sable qui l'entourait, figure une ligne en pointillé, parfaitement régulier, de petites boules d'argent séparées l'une de l'autre d'environ 1 ou 2 mm. Il semblerait qu'en chacun des points de fusion, il y ait eu répulsion du métal fondu des deux cotés. D'autres préoccupations plus urgentes de recherche appliquée ont interrompu ces investigations théoriques de recherche fondamentale.

Plus tard, un article de Science et Vie (HÉLÈNE GUILLEMOT, n° 879, 12/1990) « On avait oublié la force d'Ampère » signalait l'expérience de Peter Graneau, physicien de l'université de Boston, sur un *Water arc gun*, canon à arc lanceur d'eau d'une puissance extraordinaire, fonctionnant grâce à la force longitudinale. Graneau a publié *Newtonian electrodynamics* en 1996 à Infinite Energy. Deux physiciens, J.P. Viguier et Michel Rambaut avaient aussi publié dans *Physiques Lettres* deux articles appuyant théoriquement la force longitudinale d'Ampère.

Le mystère de cette force pourrait revenir à l'ordre du jour, si elle faisait apparaître des instabilités fâcheuses dans les plasmas des futurs réacteurs à fusion nucléaire.

La porte est entrouverte ; quel jeune chercheur doctorant aura la curiosité et l'audace de l'ouvrir ou de justifier théoriquement et expérimentalement sa fermeture définitive ?

Les médias aimeraient bien l'un ou l'autre titre : *Ampère fondateur de l'électromagnétisme s'était trompé, la force longitudinale n'existe pas — ou avait raison...* (contre Laplace).

13 - Le montage astatique est souvent attribué à Nobili dans son mémoire : Sur un nouveau galvanomètre (Bibliothèque universelle, t. XXIX, 1825). Ampère l'avait décrit en 1821 dans les Annales de chimie et de Physique t. XVIII, p.320.

14 - Le bonhomme d'Ampère, fiction de l'esprit, a un concurrent vivant, le poisson.

Le professeur Hermann de Königsberg a décrit dans un journal de physiologie (Pfüger's Archiv für Physiologie) un curieux phénomène qu'il a observé (Lumière électrique 1886/4 p.280) : Dans un vase rempli d'eau ordinaire et contenant des têtards, *Rana temporaria*, on fait passer au moyen de deux électrodes de zinc, un courant assez fort (20 éléments zinc-charbon), on voit, après un mouvement tumultueux des têtards, ceux-ci s'orienter dans le sens du courant, et plus curieux, ils se trouvent tous la tête tournée vers l'anode, donc à l'inverse du bonhomme d'Ampère. Il n'y a pas mouvement des têtards, mais simplement orientation. Décidément, les électriciens doivent beaucoup à la grenouille, celle de Galvani, puis les têtards d'Ampère.

D'où un intéressant sujet de thèse : Un vrai bonhomme nu fait la planche dans l'eau salée d'une mer calme ou celle d'un lac, traversée par le courant de piles. Comment son corps s'oriente-t-il ? Comme les têtards, ou par rapport au champ magnétique terrestre ?

L'essai devrait être fait ensuite avec une femme ; la surprise serait qu'elle s'oriente en sens inverse. Ce chercheur ajouterait dans les manuels son nom à ceux d'Oersted, Ampère et Hermann. La pêche électrique est maintenant pratiquée avec des impulsions de tension plus élevée, les poissons se dirigent vers l'anode, où on les capture dans un filet spécial.

Pour les lycéens, l'imaginaire Maxwell a remplacé le bonhomme d'Ampère par le tire-bouchon. Puis, J.A. Fleming, inventeur de la diode à vide, par la règle des trois doigts. (z2)

15 – L'unification des théories, forces et particules expliquant le fonctionnement de l'Univers est toujours ce grand et lointain objectif des physiciens depuis des siècles. Aujourd'hui elles se résument aux quatre forces fondamentales, dont la force électrique, et à douze particules, dont l'électron.

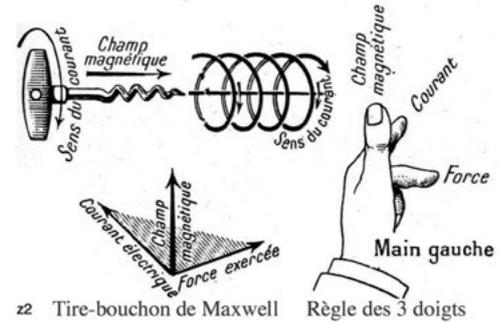
La quête du Graal se terminerait avec la découverte du boson de Higgs, hypothétique particule ultime générant toutes les autres, que le coûteux et puissant accélérateur du CERN à Genève, le LHC, va peut-être révéler...et mettre nombre de physiciens de la matière au chômage, s'il n'y a plus rien à chercher ! (Non, il y a toujours la gravitation inexpiquée). Il a été mis en service en 2010.

16 - Un portail intéressant et fiable est entièrement consacré à Ampère, URL ampere.cnrs.fr - la plupart de ses publications y sont accessibles ainsi que sur gallica.bnf.fr

17 - Ampère, N° spécial de la Revue générale de l'Electricité, 11/1922. Nombreux documents et livres à la bibliothèque de la Maison Ampère – **Musée de l'Électricité à Poleymieux** (20 km, au Nord de Lyon). C'est sur l'intervention de Paul Janet, initiateur des premiers cours d'électricité à Grenoble, que la propriété où vécut Ampère fut acquise en 1928 par deux industriels américains, MM. Hernand et S. Behn, pour être généreusement donnée à la Société Française des Electriciens, devenue SEE, qui le gère avec la Société des Amis d'Ampère.

Le musée rassemble une intéressante collection de matériels électriques que ses moyens limités, privés, ne lui permettent pas encore de présenter avec une muséographie contemporaine. Ce qu'il compense par l'authenticité de son cadre campagnard chargé d'histoire et une intéressante bibliothèque. Les lycéens lyonnais viennent y compléter leurs cours avec une vingtaine d'expériences interactives sur l'électromagnétisme.

18 - Une synthèse pratique pour le **calcul des efforts électrodynamiques** élevés dans les installations électriques, et donc destructeurs en cas ce court-circuit : *Les efforts électrodynamiques* », ANDRÉ DUCLUZAU, cahiers techniques n° 7, 2/1976, (ou suivants), ed. Merlin Gerin (devenu Schneider Electric). Nota : J'avais adopté le terme d'efforts électrodynamiques, comme le voulait Ampère, plutôt qu'électromagnétiques suivant Maxwell et notre logique. Est-ce souhaitable ?

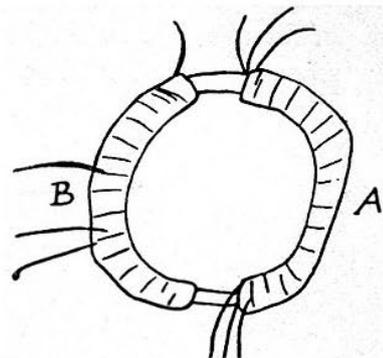




Faraday à la recherche des lois de l'électrolyse



Tore de l'induction électromagnétique



Croquis du carnet de notes de FARADAY et représentant l'appareil avec lequel ce savant découvrit le phénomène d'induction électromagnétique (29 août 1831).

5 – L'induction

L'électricité créée par une variation de magnétisme

Arago et Faraday

Dans l'histoire des sciences et particulièrement celle de l'électricité, les découvreurs et inventeurs considèrent la réversibilité d'un phénomène, ou d'une machine, comme un gage de perfection. Si l'on peut faire passer quelque chose d'un état à un autre, il doit être possible de faire l'opération inverse, par cette symétrie qu'on attribue souvent à la nature (1).

Le courant électrique venait de se révéler capable de produire du magnétisme, il serait peut-être possible inversement de créer un courant avec du magnétisme, celui d'un aimant ou celui d'un autre courant.

Les physiciens encore imprégnés par un siècle d'électrostatique, cherchaient inconsciemment à retrouver dans la nouvelle électricité galvanique les propriétés de la primitive électricité statique. Ils supputaient ainsi que le phénomène d'influence ou induction découvert par Gray se reproduirait en électricité galvanique ; si un corps chargé *induisait* dans un autre proche une électricité de signe contraire, pourquoi un courant n'induirait-t-il pas aussi un autre courant de sens contraire dans un circuit proche ?

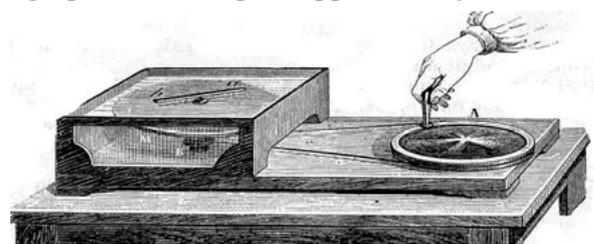
Arago découvre le magnétisme de rotation

Comme ses prédécesseurs, poseurs de question sans réponse, Galvani puis Oersted, François **Arago** découvrit un nouveau phénomène que personne n'arrivait à expliquer.

En 1822, il était directeur de l'Observatoire de Paris ; le Bureau des longitudes lui confie la mission d'aller avec Humboldt mesurer le magnétisme terrestre près de Greenwich. Au cours de ce voyage, il constate un détail : les oscillations de l'aiguille aimantée diminuent rapidement lorsqu'elle est rapprochée du fond d'une boîte en cuivre.

À son retour, il en parle au mathématicien Poisson ainsi qu'à Gambey, constructeur d'appareils scientifiques de précision. Celui-ci lui confirme qu'il a lui aussi constaté ce ralentissement des oscillations des aiguilles proches de pièces en cuivre. Pris par d'autres travaux, Arago reporte à plus tard des expériences pour étudier la question et ce n'est qu'en novembre 1824 et mars 1825 qu'il communique à l'Académie ses recherches sur cet étrange phénomène qu'il appelle, *magnétisme de rotation*.

Une hypothèse serait la présence d'une très faible proportion de fer dans le cuivre, comme l'avait envisagé Coulomb pour expliquer le faible magnétisme de diverses substances. Alors Arago teste l'effet de plusieurs matériaux sur le freinage de l'aiguille aimantée ; l'effet est plus notable avec les bons conducteurs, mais l'eau et la glace amortissaient aussi faiblement les oscillations de l'aiguille.



a

Rotation du disque d'Arago

Pour mieux analyser le phénomène, il réalise un appareil dans lequel un disque en cuivre, placé sous une aiguille aimantée, peut être mis en rotation rapide à la main.

Les deux éléments sont séparés par une plaque de verre pour éviter l'entraînement de l'aiguille par l'air mis en mouvement par le disque. (a) Sa prévision se confirma : au repos l'aiguille étant alignée avec le méridien terrestre, dès que le disque était mis en rotation, elle pivotait dans le même sens, en accélérant elle se plaçait à 90 degrés, puis elle se mettait elle aussi à tourner, mais moins vite que le disque.

L'étrange expérience est répétée avec diverses variantes par plusieurs physiciens à la recherche d'une explication :

– Babbage et Herschell inversent les deux éléments, ils mettent en rotation un aimant en fer à cheval, le disque en cuivre placé au-dessus se met à tourner, le phénomène est donc réversible (b).

– Faraday lui, place dans l'entrefer d'un gros électroaimant un cube de métal A suspendu à un fil de torsion (c). Le fil est enroulé plusieurs fois autour de son axe, puis relâché, le cube tourne alors rapidement, mais si l'on envoie du courant dans l'électroaimant, la rotation du cube se ralentit.

– Plücker et Tyndall reprennent l'expérience, ce dernier compare l'espace entre les pôles de l'aimant à un milieu visqueux ralentissant le mouvement du cube, il constate l'échauffement de la pièce, pourquoi ?

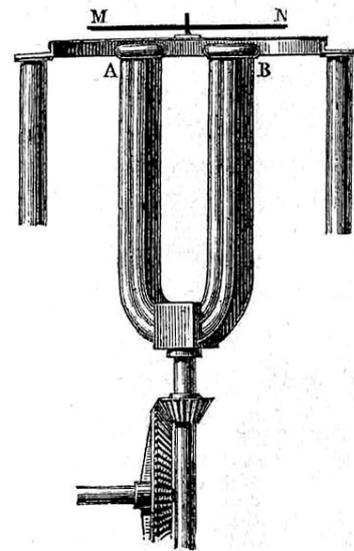
– Le problème intrigue Sturgeon, Seebeck en Allemagne, Nobili en Italie. Le mathématicien français Poisson, imbu des principes newtoniens d'attraction à distance, affirme que tous les corps acquéraient une aimantation temporaire en face d'un aimant, mais elle ne disparaissait pas instantanément, théorie qui n'était pas en accord avec les expériences.

La Royal Society attribua la médaille Copley de 1825 à François Arago pour cette découverte d'un phénomène inexpliqué.

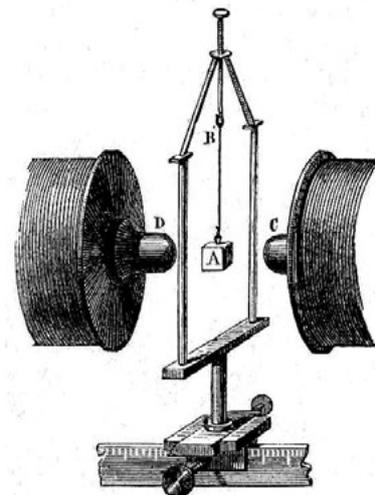
Le jeune ingénieur physicien genevois, Daniel **Colladon** se rendait souvent à Paris ; il demanda à Ampère et Arago si l'on obtiendrait le même résultat en remplaçant l'aiguille aimantée par un solénoïde parcouru par du courant. La réponse est positive et Colladon est autorisé à préparer l'expérience au Collège de France. Mais cela ne marche pas, Ampère en est très désappointé. Le montage est alors modifié, le disque de cuivre tournant entraîne bien le solénoïde. Colladon est invité à présenter son expérience devant l'Académie le 4 septembre 1826, il est félicité en particulier par Laplace.

Aucune explication ne se dégageait de ces expériences ; il faut remarquer que ce n'était pas simple du tout, une combinaison de plusieurs effets, le champ magnétique doit être variable pour induire un courant dans un conducteur massif, lequel courant réagit avec la force d'Oersted pour faire tourner l'aimant. Les esprits n'étaient pas encore préparés à ce nouvel aspect d'un effet magnétique variable dans l'espace ou dans le temps, donc fugitif si la variation n'était pas continue.

C'est ce qui égara tous les expérimentateurs, même Faraday au début, qui ne s'attendaient pas à un effet fugitif en plaçant un aimant près d'une bobine,



b-Expérience de Babbage et Herschell



c Expérience de Faraday

comme les prédécesseurs d'Oersted qui avaient mis un aimant près d'une pile, alors qu'il fallait le mettre près du fil rejoignant ses deux bornes, parcouru par un courant. Mais là encore l'inéluctable, mais encore ignorée conservation de l'énergie, ne permettait pas la production d'un courant sans apport d'une énergie extérieure.

On rapporte aussi le déboire de Colladon en 1825, qui avait placé un aimant dans une bobine, connectée à un galvanomètre, l'une des expériences à venir de Faraday; mais de peur d'influencer l'appareil de mesure par l'aimant, il le plaçait très loin, dans la pièce à côté. Comme il était seul, après la mise en place de l'aimant, il allait rapidement constater à côté si le galvanomètre déviait, le courant induit fugitif qu'il aurait pu découvrir pendant l'introduction de l'aimant dans la bobine avait cessé. Il n'insista pas. La jeunesse trop fougueuse manque de persévérance !

Il faudra attendre encore sept ans et un expérimentateur très méticuleux, méthodique et observateur pour faire la découverte de l'induction, la cause de la rotation du disque d'Arago — quelques-unes des qualités de Michael Faraday.

La découverte manquée par Ampère et de La Rive (2)

Ampère envisageait dans sa théorie que le magnétisme dans le fer résultait de la circulation de courants moléculaires. Lorsqu'un solénoïde parcouru par un courant aimantait une tige de fer placée à l'intérieur, il cherchait si ces courants dans le fer étaient créés par *l'influence* du courant du solénoïde ou bien par *entraînement ou orientation* de courants préexistants dans le fer. Peut-être ces courants existaient-ils aussi dans le cuivre ?

Il conçut avec son ami de La Rive une expérience sur ce sujet, qu'ils réalisent à Genève l'été 1822. L'appareil (d) comprenait un bobinage A qui pouvait être traversé par le courant d'une pile, un fil de torsion isolé traversant le haut de ce bobinage soutenait un cercle en cuivre B, proche et concentrique au bobinage. À gauche un fort aimant englobait dans son entrefer les deux circuits.

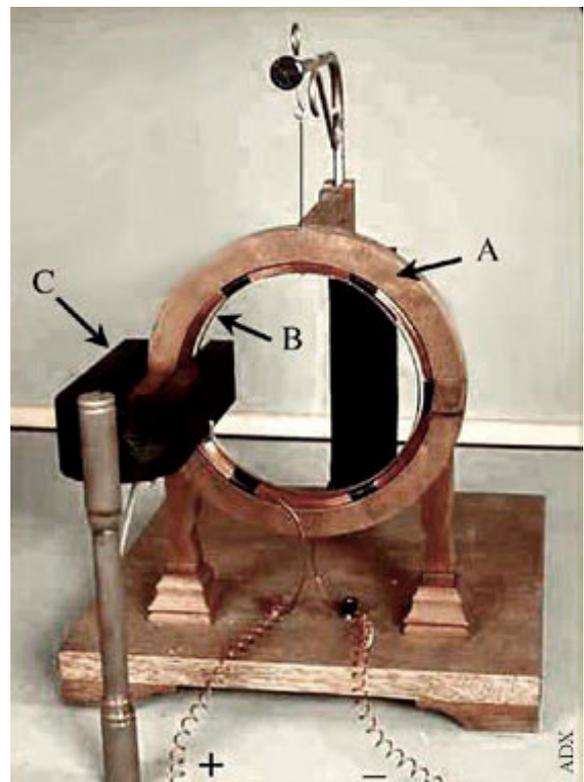
En lançant le courant de la pile dans le bobinage, on constatait une légère rotation de l'anneau témoignant de la naissance d'un courant fugitif dans l'anneau, réagissant avec l'aimant. En coupant le courant de la pile, c'est une rotation en sens inverse qui se produisait.

Aucune conclusion nette n'apparaissait sur l'existence des courants moléculaires cherchés par Ampère. Il note simplement l'anomalie remarquée dans le mémoire présenté sur ce sujet à l'Académie le 4 sept. 1822 à Paris et édité à Genève:

« Il s'établit dans un conducteur mobile formant une circonférence fermée, un courant électrique par l'influence de celui qu'on produit dans un conducteur fixe circulaire placé très près... »

Ce sont les conclusions que Faraday obtiendra neuf ans plus tard, par un moyen différent. Ampère et de La Rive avaient découvert l'induction en cherchant autre chose, mais estimaient que ce phénomène fugitif n'avait pas d'intérêt.

Un tel phénomène s'il était permanent nécessiterait qu'on lui apporte de l'énergie en permanence, comme l'exige le principe de conservation de l'énergie, encore inconnu.



d Expérience Ampère- de La Rive

Ampère n'avait toujours trouvé que ce qu'il cherchait, le hasard n'était jamais intervenu dans ses recherches – dommage. Trop concentré sur son objectif, il ne perçut pas le clin d'œil que lui faisait le hasard et appliquait sa méthode de travail trop rigoureuse, sans se laisser distraire. Pas plus que pour tous les lecteurs de son mémoire, un phénomène imprévisible et fugitif ne valait pas qu'on s'y attarde. Faraday avait réagi d'une façon semblable au début de ses expériences, mais c'était un obstiné !

Dix ans plus tard, en 1832, après la découverte de Faraday, Ampère écrivait sans amertume à de La Rive: « Malheureusement ni vous ni moi ne songeâmes à analyser ce phénomène et à en reconnaître toutes les circonstances. Nous aurions vu ce qu'à découvert depuis M. Faraday, que ce courant ne dure qu'un instant et qu'il a lieu en sens contraire du courant établi dans la spirale qui le produit par induction. »

Faraday découvre l'induction

Entré en 1813 à la célèbre Royal Society par la petite porte, comme aide préparateur de Davy, il s'était d'abord fait remarqué dans le domaine chimique, puis bien conseillé par Wollaston il participa aux travaux déclenchés par les découvertes d'Ampère, puis sur la question du magnétisme de rotation d'Arago. En 1824, malgré des désaccords personnels avec Davy qui prenait ombrage de la compétence de son assistant, il est élu membre de la Society et retourne à la chimie, mais sans oublier l'électromagnétisme comme il le note :

« ...l'espoir d'obtenir de l'électricité par le magnétisme ordinaire m'ont porté à différentes époques à expérimenter l'effet inductif des courants électriques. »

Sa méthode de travail paraissait bien adaptée au délicat problème à résoudre : Pas de spéculations intellectuelles fumeuses, pas de mathématiques qu'il ignorait complètement, uniquement des expériences positives ou tentatives échouées, notées en détail sur ses cahiers de laboratoire. Tout cela guidé par une intuition sans doute aiguë, mais bien contrôlée pour ne pas prendre ses espoirs pour des réalités.

Les centaines d'articles numérotés de ses cahiers montrent que sa découverte n'eut pas la forme d'un éclair de génie, ni d'un hasard, mais d'une approche patiente et laborieuse, pas à pas vers la lumière. Leur lecture permet de retracer le long cheminement et les hésitations de sa pensée.

Extrayons brièvement des 264 articles de son premier mémoire, les plus significatifs sur cette question :

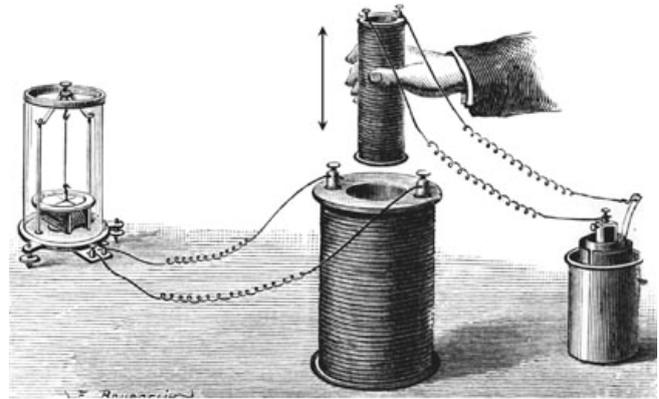
– **Du n° 6 à 9**, il entortille sur un manchon de bois deux bobines d'une douzaine de spires de fil isolé dont l'une est reliée aux piles, l'autre au galvanomètre : « *l'aiguille du galvanomètre ne présente pas la moindre déviation* ».

– **En 10**, il augmente le nombre de spires : « deux cent trois pieds de longueur, et la puissance de la pile, cent couples de quatre pouces carrés...Lorsque le contact fut établi, il se rendit sensible au galvanomètre par un **effet soudain et très léger**, et il en fut de même au moment où le contact fut interrompu. Mais pendant que le courant voltaïque passait dans l'une des spirales, on ne remarqua aucune apparence galvanométrique indiquant un effet quelconque sur l'autre spirale, quoique la pile eût manifesté sa grande activité par la chaleur qu'elle avait dégagée dans toute la spirale, et par l'éclat de sa décharge dans le charbon »

– **L'expérience 11** utilisait une grosse pile de cent vingt couples, son ami et biographe Tyndall rapporte : « Mais c'est ici que la puissance de vision latérale de Faraday, qui lui permettait d'observer en dehors de la ligne de mire, lui venait en aide : il remarqua que **l'aiguille faisait un léger mouvement** chaque fois qu'il fermait le circuit, qu'elle revenait ensuite à sa position d'équilibre et s'y maintenait tranquille, sans être influencé par le courant qui coulait. Mais au moment où le circuit est coupé, l'aiguille se mouvait de nouveau, et cette fois dans une direction opposée à celle observée à la fermeture. »

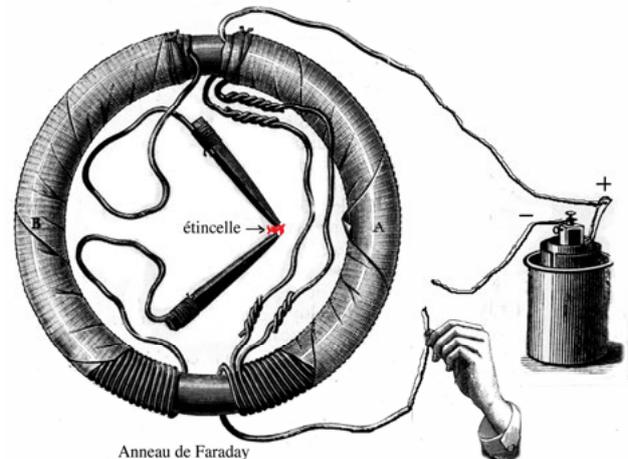
Jusqu'à là Faraday travaillait sur des circuits fixes dont l'un devait induire un courant dans l'autre par un intermédiaire qui ne pouvait être autre que ce champ magnétique dont il avait l'intuition. Progressivement il comprit que ce champ devait être variable, notion contre-intuitive au bon sens.

– **En 18**, il opère avec deux circuits en forme de W fixés chacun sur une planche et cette fois, c'est par un déplacement d'un circuit, en rapprochant ou éloignant l'une des planches de l'autre, que déviait l'appareil ; opération analogue à la démonstration où chacun des circuits inducteurs et induit est une bobine (e).



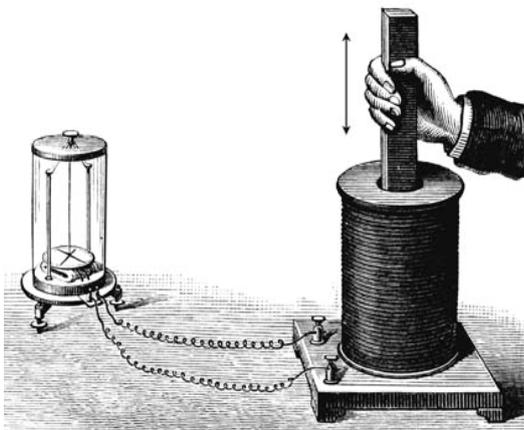
e Induction par déplacement d'un circuit

– les **expériences 27 à 30** confirmeront les effets constatés dans les précédentes, mais avec beaucoup plus de force, car Faraday remplace ses cylindres en bois par un anneau de six pouces de diamètre extérieur, fait avec une barre de fer ronde (3). Sur la moitié A de ce "tore" sont enroulés trois circuits qu'on peut relier ensemble par les fils extérieurs, ils sont connectés à une pile de seulement dix couples. La moitié B est reliée au galvanomètre. Sur la gravure (f) sont figurés, à la place de cet appareil, deux charbons pointus entre lesquels apparaît une petite étincelle fugitive ; ce montage avait été réalisé dans une expérience ultérieure avec un dispositif plus puissant, pour prouver visuellement l'existence de ce nouveau courant.



f Induction par contact ou coupure

« A l'établissement du contact, le galvanomètre en fut immédiatement affecté, et à un degré fort au-delà de celui qu'on avait remarqué lorsque, avec une pile de force décuple, on avait fait usage de spirale sans fer ; mais quoi que le contact continuât, l'effet ne fut pas permanent, car l'aiguille vint bientôt reprendre sa position naturelle, comme si elle ne ressentait nullement l'influence de l'appareil électromagnétique... » On devine chez Faraday la déception de ne pas obtenir un courant induit permanent



g Induction par déplacement d'un aimant

L'expérience 30 consistait à introduire un aimant rectiligne dans une bobine reliée au galvanomètre comme le représente la gravure (g), l'expérience manquée de Colladon : « ... l'effet n'était pas grand, mais en avançant ou retirant l'aimant de manière que chaque impulsion de l'aiguille fût chaque fois ajoutée aux impulsions précédentes, celle-ci pouvait étendre ses oscillations

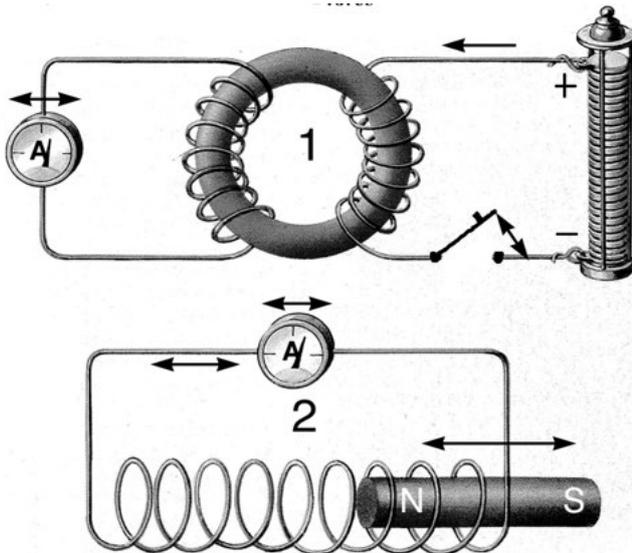
jusqu'à une amplitude de 180°, et même davantage... »

Ces deux expériences fondamentales, f et g, de la découverte de l'induction sont schématisées sur la figure g2.

Faraday venait, sans le réaliser bien sûr, d'inventer avec son anneau un **transformateur**, ainsi que la production de **courant alternatif** en introduisant et retirant successivement l'aimant d'une bobine, qui resteront oubliés ou presque pendant un demi-siècle ! L'original de ce modeste mais génial anneau magique est conservé à la Royal Society, une reproduction est présentée au *Science Muséum* (en première page) une autre au musée Ampère.

Sa conclusion est dans l'article 57 : « **Toutes les expériences rapportées dans cette section prouvent très complètement, je pense, la production de l'électricité par le magnétisme ordinaire.** »

Elles datent d'août 1831.



g2 Découverte de l'induction - 1831

Un simple et majestueux point final à 10 ans de recherches pour expliquer le magnétisme de rotation d'Arago, ce qui l'a conduit bien plus loin, à cette découverte de l'induction, totalement insolite, et d'ailleurs toujours aussi difficile à comprendre par les élèves électriciens d'aujourd'hui, comme le grand public. Elle n'est pas intuitive.

Ce n'était encore qu'une partie du riche legs de Faraday à la science. Le mémoire est présenté à la Royal Society les 24 novembre 1831 et 12 janvier 1832. : *Experimental Researches in Electricity* : I- Sur l'induction des courants électriques. II- Sur la production d'électricité par le magnétisme. III- Sur un nouvel état électrique de la matière. IV- Sur le phénomène magnétique d'Arago

S'ouvrait un vaste domaine d'investigations et surtout nombre d'applications, mais dans l'immédiat, on ne percevait pas bien ce qu'apportait ce nouveau courant, assez semblable au courant des piles, malheureusement très fugitif, donc incapable de susciter une action chimique prolongée.

Cela peut surprendre, mais la découverte de l'induction, d'une importance exceptionnelle par ses applications à venir, ne suscita pas un étonnement particulier à sa révélation. Aussi, il ne semble pas qu'il y ait eu en Angleterre ou à l'étranger la classique levée de contradicteurs, comme pour les découvertes d'Ampère. Celui-ci fut d'ailleurs dans les premiers, en moins d'un an, à trouver dans ce nouveau phénomène le principe des futurs générateurs d'électricité, par conversion d'énergie mécanique, la machine de Pixii. (II-3)

Avant de vérifier s'il était bien le même que le courant voltaïque ou galvanique, en produisant les mêmes effets, on dénomma quelque temps le courant d'induction *courant faradique*.

La découverte de cet étrange phénomène de l'induction avait été frôlée d'un cheveu par au moins une dizaine de physiciens compétents, dont Colladon, Ampère, de la Rive et probablement d'autres inconnus. De l'autre côté de l'Atlantique, dans cette jeune Amérique encore à la recherche d'une identité, un électricien s'en était approché encore plus que les autres.

Henry découvre la self-induction

Qu'un circuit inducteur, parcouru par un courant variable, *qui commence ou qui finit*, fasse naître un courant induit dans un autre circuit proche, devait entraîner à fortiori que ce circuit inducteur induise aussi un courant dans lui-même.

En 1830, Joseph Henry, professeur au New Jersey, avait lui aussi perçu le phénomène d'induction d'un courant fugitif dans un circuit, mais ne l'avait pas annoncé et le regretta.

Cela l'amena en 1832 à en déduire en complément qu'un circuit parcouru par un courant variable génère en lui-même un courant induit.

Ce phénomène de *self-induction*, en français *auto-induction*, fut aussi détecté par Faraday en 1834. Henry fit valoir son antériorité, un conflit de priorité s'ensuivit, cela ne correspondait pas du tout avec le caractère de Faraday, mais son entourage l'amplifia avec ses susceptibilités nationales. Le nouveau continent souffrait de n'être pas reconnu scientifiquement par le vieux continent. L'antériorité d'Henry pour la self-induction fut admise par la découverte d'un document oublié. Faraday fut alors crédité de la *mutuelle induction* d'un circuit sur un autre, mais peu lui importait l'honneur de la Royal Institution.

Henry avait construit le plus puissant électro-aimant de l'époque, capable de porter un poids de 3500 pounds. Lorsqu'il coupait l'important courant d'excitation de son électro-aimant, une très forte étincelle se déclenchait. Pourquoi ? La self-induction ou auto-induction était alors à l'origine de l'étincelle de rupture. Elle est d'autant plus élevée que l'enroulement et le courant d'une bobine est important.

L'*auto-induction* peut être définie comme la propriété remarquable de tout conducteur parcouru par un courant, de s'opposer aux variations, augmentation ou diminution de ce courant (4). On doit aussi à Henry une simple disposition pratique des fils d'alimentation, bien connue des électriciens : pour annuler pratiquement la self-induction, il suffit de les enrouler en torsade l'un sur l'autre.

L'importance de ces deux phénomènes similaires, auto-induction d'un circuit sur lui-même et mutuelle induction d'un circuit sur un autre proche se révélera progressivement au cours des développements et progrès de l'électricité tout au long du siècle.

On désignera par *inductance propre* cette propriété de tout élément de circuit, et par *inductance mutuelle*, celle de deux circuits couplés magnétiquement.

L'unité d'inductance, définie en 1881, sera le *henry*. Le *farad*, définissant la capacité du condensateur réalisa une sorte d'équilibre entre les découvreurs, comme d'ailleurs dans les circuits électriques.

L'inductance

Tout élément de circuit, dipôle passif, possède une inductance, c'est le coefficient L , quotient du flux du champ magnétique créé par le courant qui le traverse, par l'intensité de ce courant. Mais il est souvent plus pratique de définir L par la tension aux bornes de l'inductance, entraîné par la rapidité de variation du courant:

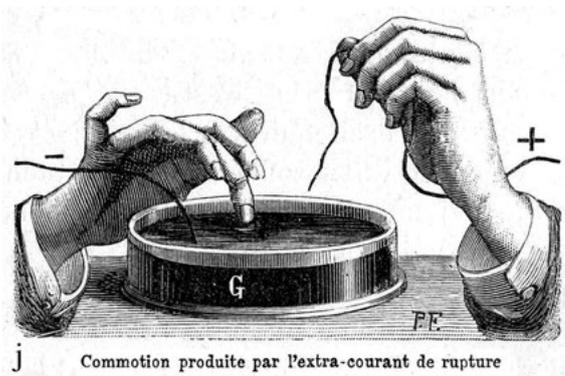
$$u = L \, di/dt$$

Ceci a pour conséquence que la tension aux bornes d'une bobine brusquement déconnectée de la source peut être très élevée si le courant diminue très vite ; d'où la surtension que l'on ressent dans l'expérience (j).

Heureusement l'étincelle, l'arc, bien que fugitif, augmente la durée de décroissance du courant, évitant une surtension infinie si ce courant était interrompu dans un temps nul.

Sur le plan énergétique, on découvrira plus tard (Maxwell - Heaviside) que la circulation d'un courant entraîne un stockage d'énergie dans l'inductance : $w = 1/2 L \cdot I^2$

Ce problème énergétique trop longtemps incompris retardera de plus de 40 ans la conception des génératrices et moteurs en courant continu. Après le condensateur, découvert avec la bouteille



de Leyde, l'inductance a été la deuxième caractéristique fondamentale des circuits. La plus simple, la résistance, avait déjà été définie par Davy, puis Pouillet et Ohm.

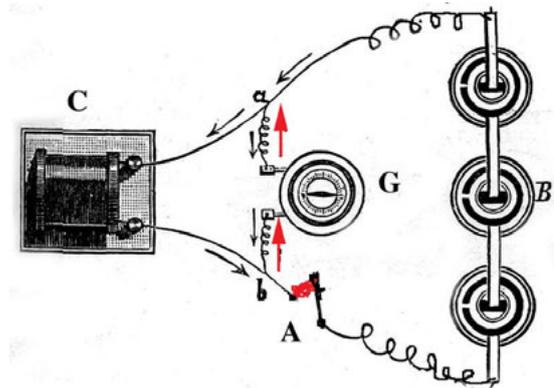
Ces trois caractéristiques de tout élément de circuit, **résistance R**, **inductance L**, **capacité C** sont la base de l'étude des circuits composés de R L C pour l'élève électricien. Leur influence est très différente, surtout pour les deux derniers, suivant que le courant est continu ou variable, en particulier alternatif.

L'extra-courant de rupture.

Tel fut le nom que Faraday donna à ce phénomène apparemment anodin à l'époque, constaté aussi par Henry, semble-t-il, mais dont les conséquences destructrices se révéleront très contraignantes dans la conception des machines.

L'expérience qu'il réalisa (h) pour comprendre ce courant consiste à placer un galvanomètre G aux bornes d'une bobine C alimentée par des piles B. Le courant qui circule, repéré par les flèches noires, passe en partie dans l'appareil de mesure qu'il fait dévier.

À la coupure du circuit par l'interrupteur A, le courant dans la bobine ne s'arrête pas instantanément, mais décroît progressivement en traversant le galvanomètre G qui dévie en sens inverse. Dans un montage normal, sans le galvanomètre, l'ouverture de l'interrupteur s'accompagne d'une forte étincelle, due à l'extra courant continuant à parcourir le circuit à travers cette étincelle, pendant un temps d'autant plus long que le bobinage a beaucoup de spires, et surtout, si c'est un électro-aimant avec un noyau de fer, c'est à dire une forte inductance.



h Extra-courant de rupture

Cette étincelle permet la dissipation sous forme de chaleur de l'énergie électromagnétique restant accumulée dans toute bobine, tant que le courant ne s'est pas annulé. Sinon une forte tension instantanée s'y développe ... jusqu'à un claquage destructif.

Une rare application utile de cette étincelle de rupture est l'allume-gaz électrique, souvent accroché dans les cuisines au début du XX^e siècle. La mèche de l'allumoir, à droite, trempe dans l'alcool ; on le frottait dans la rainure verticale en provoquant des étincelles de ruptures du courant dans une petite bobine alimentée par le réseau située dans le boîtier.

Par contre, dans la bobine d'induction dite de Ruhmkorff (II-4), la bobine primaire à basse tension est coupée et excitée à très grande cadence par le contact d'un rupteur très particulier pour ne pas subir les étincelles de l'extra-courant de rupture. Sur les premiers moteurs à gaz Lenoir, ces contacts étaient très vite abimés par les étincelles d'extra-courant. Fizeau trouva la solution en mettant un condensateur en parallèle avec le rupteur. Solution adoptée pour allumer les bougies sur des milliards de moteurs à essence, jusqu'à les années récentes



allume-gaz à étincelles

Cet extra-courant de rupture fut un véritable cauchemar dans la conception des générateurs électromécaniques à collecteurs. Il faudra des dizaines d'années pour que les électriciens arrivent à comprendre son rôle énergétique, puis le maîtriser.

Des dizaines d'années seront aussi nécessaires au début du XX^e siècle pour que les électriciens arrivent à contrôler les puissants arcs électriques qui se manifestent inexorablement à la séparation des

contacts de tout appareillage électrique de coupure, surtout dans les cas de court-circuit atteignant des dizaines de milliers à plus de 100 000 ampères.

Apports théoriques de Faraday

L'induction

Ce fut la troisième découverte fondamentale du siècle après celles de Volta puis d'Ampère ; elle ouvrait la voie royale permettant le développement des applications pratiques, principalement les **générateurs** d'électricité à partir d'énergie mécanique de toute nature. Comme souvent les grands découvreurs Faraday n'était pas intéressé par les inventions qui suivent la piste qu'ils ont amorcé dans l'inconnu. Sans bases mathématiques, il laissait même à ses successeurs le soin de formuler et quantifier ce nouveau phénomène. Ce fut le physicien russe d'origine allemande, Heinrich **Lenz** de St Petersburg, qui formula en 1834 la **loi de l'induction** :

« Lorsqu'un courant est induit par le mouvement relatif d'un conducteur et d'un courant ou d'un aimant, l'action inductrice tend à développer dans le conducteur un courant dirigé de telle façon que sa réaction électrodynamique sur le courant ou sur l'aimant tende à produire un mouvement contraire au mouvement réel. »

Ou plus simplement, dans les manuels : « Lors du déplacement relatif d'un courant ou d'un aimant et d'un circuit, les courants qui prennent naissance dans celui-ci font naître des forces qui s'opposent au mouvement qui les produit ».

Le mathématicien Franz **Neumann** de Königsberg donna dans sa *Théorie mathématique de l'induction*, en 1845, la formule fondamentale permettant de calculer la force électromotrice d'induction :

$$E = - d\Phi / dt$$

Soit l'opposé du quotient de la variation de flux magnétique Φ par la durée de cette variation.

Cette loi de Lenz ou loi de Lenz-Faraday pourrait aussi s'appeler loi de Lenz-Faraday-Neumann

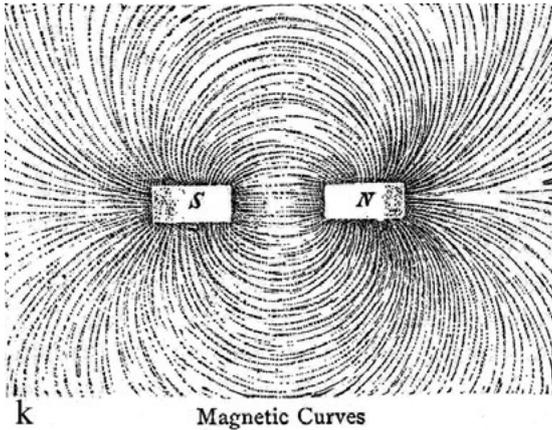
Les lignes de force du champ magnétique

Découvrir un nouveau phénomène est toujours l'ambition du physicien, mais reste ensuite à le comprendre pour en expliquer les causes. Faraday se retrouvait ainsi, comme ses prédécesseurs, Galvani, Oersted, Arago, dans la situation de « poseur de question » sans réponse. Il lui fallait comprendre par quel intermédiaire cette variation du magnétisme d'un circuit, ou d'un aimant, pouvait induire à distance un courant dans un circuit voisin.

Après de laborieuses recherches et spéculations, il arrivait à une explication qualitative, ne possédant pas l'outil mathématique, puis permettra à Maxwell de concrétiser le champ magnétique.

L'action newtonienne directe, d'un point à un autre, qui avait régi la physique jusque-là était inapplicable. Reprenant l'idée à peine esquissée par Oersted puis Ampère, que le courant circulant dans un fil modifiait *l'environnement* autour de lui, Faraday supposait qu'il le mettait dans un état particulier d'*électrotonic state* ; pratiquement pour nous, un champ magnétique.

Se souvenant de l'expérience d'Arago des brins de limaille, qui l'avait conduit à l'aimantation du fer et l'électroaimant, il s'inspira de ces *spectres magnétiques* pour bâtir sa théorie des *lignes de force ou courbes magnétiques* (k). Ces lignes de force permettaient de concevoir sans difficulté les actions réciproques des aimants et des courants en appliquant deux règles simples :



– Semblables à des fils élastiques elles tendent à entraîner les courants ou les aimants de manière à ce qu'elles prennent la plus petite longueur possible.

– Les lignes de force de même sens, situées côte à côte se repoussent.

Mais ces lignes, modifiant l'électrotonic state devaient s'appliquer à un milieu environnant inconnu mais réel, cet *éther* que Maxwell adoptera aussi. Ce grand problème d'un milieu remplissant le vide, envisagé par Ampère, soulevé par Faraday, sera nécessaire aux physiciens pour expliquer en particulier la lumière ; les physiciens du XX^e arriveront finalement à s'en passer.

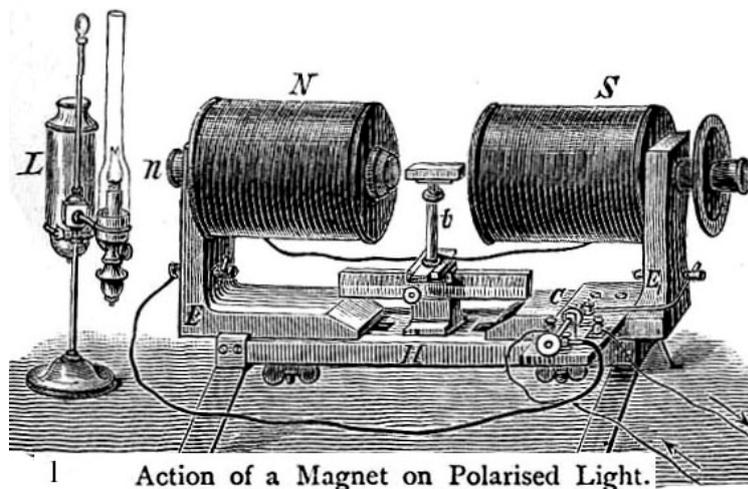
Ampère, déjà très dérangeant pour beaucoup, n'avait pas osé remettre en question le dogme de l'action newtonienne. Sa maîtrise du calcul infinitésimal lui permit de tourner la difficulté. Faraday rompit avec le dogme en proposant, sans encore le nommer, la notion de champ magnétique, dans lequel les éléments de courants étaient attirés suivant les lignes de force. Il réalisa que les phénomènes d'induction ne dépendent que du mouvement relatif du conducteur par rapport aux lignes de force. Ce que ses successeurs, Gauss, Maxwell exprimèrent ainsi :

«Un circuit tend à se disposer dans un champ magnétique, de manière à embrasser le plus grand nombre possible de lignes de force.»

L'effet Faraday, la lumière réagit au magnétisme

La curiosité méthodique de Faraday s'exerça dans de nombreux domaines. Comme d'autres avant et après lui, il était convaincu de l'unicité des forces naturelles et en particulier cherchait les rapports qui pouvaient exister entre électricité ou magnétisme et lumière.

Par ailleurs W. Thomson essayait d'exprimer les lignes de force en termes mathématiques, ce qui suggérait que l'électricité pouvait influencer la lumière sous sa forme polarisée. Mais quelle expérience pourrait prouver cette influence ? Faraday qui avait prouvé avec l'induction que des forces électriques pouvaient se transformer en magnétisme fut ainsi conduit à essayer l'influence du magnétisme sur un état sensible de la lumière, son plan de polarisation.



En 1845, Il annonça la découverte de *l'aimantation de la lumière et l'illumination des lignes de forces magnétiques*. Dans l'expérience (1) un morceau de verre lourd au plomb, était placé entre les pôles d'un fort électroaimant, percé d'un petit canal longitudinal. Une lumière polarisée était transmise

par ce canal et l'on constatait dans la lunette que son plan de polarisation tournait en fonction de l'intensité du courant de l'électro.(5)

« Il est donc prouvé que les forces magnétiques et la lumière ont des rapports mutuels ».

Nombreux furent les physiciens qui renouvelèrent l'expérience, à la recherche d'une explication. Cet effet magnéto-optique ou *effet Faraday* demandera du temps pour être expliqué.

Il influencera tous les physiciens et conduira Maxwell à aller plus loin dans ce rapprochement lorsqu'il arriva à formuler mathématiquement le champ électromagnétique.

Ce résultat provisoire incita cependant Faraday à explorer plus à fond les propriétés magnétiques de la matière.

Le magnétisme des corps

De méticuleuses recherches le conduisirent à étudier l'effet du magnétisme sur tous les corps, qu'il classa en trois catégories :

- Les plus nombreux sont *diamagnétiques* s'orientent perpendiculairement, très faiblement, aux lignes de force ; tels sont cuivre, eau, bismuth etc. (6).
- Les *paramagnétiques* s'orientent dans le sens du champ magnétique, mais faiblement, parallèlement à ces lignes : métaux alcalins, platine, aluminium etc.
- Les *ferromagnétiques*, de même, mais fortement : nickel, cobalt et surtout le fer.

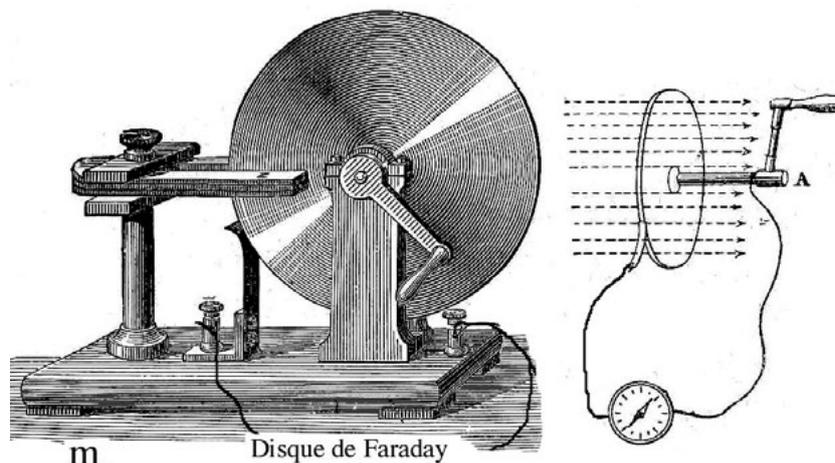
Experimental Researches in Electricity

Sous ce titre Faraday édita trois gros volumes rassemblant 24 ans de travail en 3000 paragraphes. Il y ajouta en 1859 les *Experimental researches in Chemistry and Physics*, suivi de trois autres livres (7). Certainement, le volume de données scientifiques le plus important qu'ait jamais transmis à la postérité un apprenti relieur, qui avait commencé à lire les livres scientifiques de la Royal Society pendant qu'il les reliait.

Applications

Disque de Faraday (m)

Ce fut la première, la plus directe et évidente application qui vint à l'idée de Faraday. Un disque de cuivre est mis en rotation par une manivelle, un aimant applique un champ perpendiculaire au disque, chaque rayon du disque représente un conducteur mobile dans ce champ, la force électromotrice d'induction y développe un courant que l'on recueille entre la périphérie du disque et son axe.



m Disque de Faraday

L'explication n'est pas si simple, il s'agit en fait de dériver dans un circuit extérieur ces courants induits qui freinaient mystérieusement le disque d'Arago. Aussi le sens du courant change si l'on inverse le sens de rotation.

Une première génératrice de courant continu était inventée. Cette *machine homopolaire* a été parfois industrialisée, mais ne donne que de très basses tensions.

C'est la seule qui génère directement du courant continu : nous verrons, (II-3), que les futures dynamos génèrent de l'alternatif, ensuite redressé par l'artifice du collecteur.

Simultanément, ce disque démontrait pour la première fois la **réversibilité des machines**, c'était en effet une roue de Barlow, un moteur basé sur la force d'Ampère, devenant générateur basé sur l'induction de Faraday, quand on faisait tourner le disque à la main.

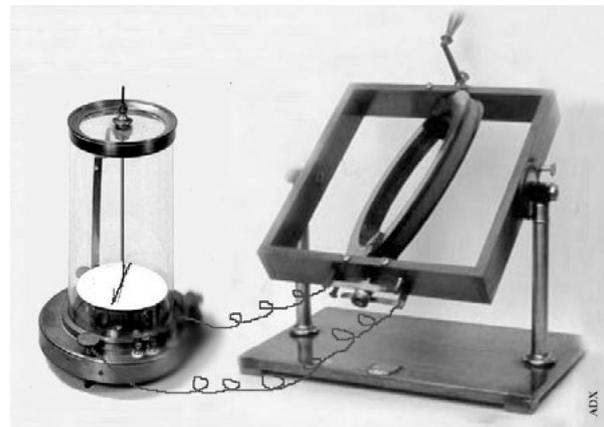
Le champ terrestre inducteur

Faraday est allé plus loin, tester si la composante verticale du champ terrestre pouvait aussi induire un courant dans un conducteur en mouvement horizontal. C'était une autre machine réversible, Ampère ayant fait dévier par le champ terrestre une bobine parcourue par un courant, comme l'aiguille aimantée d'une boussole.

Il fallait un conducteur très long, le champ étant très faible, l'eau de la Tamise devait faire l'affaire. Il disposa à côté du pont de Waterloo, sur les deux rives opposées, une plaque de cuivre, l'une était reliée par un long fil passant sur le pont à un appareil de mesure situé à côté de l'autre plaque. Aucun effet ne se manifesta, l'eau n'était peut-être pas un bon conducteur. Son ami Wollaston reprit l'expérience à l'embouchure de la Tamise, où l'eau saumâtre devait mieux conduire le courant. Succès! Cette expérience donnera naissance plus tard à la magnétohydrodynamique (II-2).

Un autre expérimentateur, Delezenne, construisit un appareil pour générer de l'électricité à partir du champ magnétique terrestre et de la force humaine (n). En orientant convenablement le cerceau par rapport au champ terrestre, la rotation à la main du cerceau produit un faible courant, mais changeant de sens à chaque demi-tour. Un commutateur à bagues permettait de "redresser" ce courant détectable dans un galvanomètre.

C'est un champ d'application pour produire l'électricité avec un matériel simple, encore inexploré par les chercheurs de nouvelles énergies. Mais il faudrait concentrer très fortement ce faible champ !



n

cerceau de Delezenne

Machine de Pixii

À peine un an après la découverte de l'induction, Pixii constructeur d'appareils pour les expériences faites à l'université de Paris, fabrique sur les conseils d'Ampère la première génératrice de courant alternatif, ancêtre des alternateurs d'aujourd'hui. Ensuite, en redressant ce courant, on obtenait un courant de même sens, dit continu.

Ce fut le début d'une longue histoire, dans un prochain chapitre (II-3).

Tous les générateurs électromécaniques seront basés sur l'induction.

Bobine d'induction ou bobine de Rhumkorff

Semblable au tore de Faraday, mais avec un circuit magnétique ouvert. Deux bobines sont disposées concentriques sur un axe en fer. L'une est alimentée par un courant interrompu à une cadence élevée par divers systèmes, l'autre avec un enroulement à grand nombre de tours produit alors une tension oscillante très élevée à ses bornes.

Ce générateur particulier, ou plutôt transformateur, est décrit en (II-4).

Courants de Foucault ou courants tourbillonnaires

Ce sont les courants induits créés dans une masse conductrice soumise, soit à un champ magnétique variable, soit à un déplacement dans un champ constant, ils expliquent le mystérieux magnétisme de rotation d'Arago. Les courants ainsi créés se referment sur eux-mêmes à l'intérieur de la masse suivant des chemins semblables à des tourbillons en provoquant un échauffement de la masse. Deux conséquences s'ensuivent, un échauffement par perte d'énergie et éventuellement des forces s'opposant au mouvement qui les a produits suivant la loi de Lenz. Ces courants étaient la cause du magnétisme de rotation. Leur effet néfaste se manifesterait dans la plupart des machines électriques, imposant de feuilletter les circuits magnétiques massifs. Néanmoins, ils ont trouvé quelques applications utiles : chauffage par induction, freinage des véhicules.

Léon Foucault, physicien français, utilisa ce phénomène pour démontrer un aspect du principe de la conservation de l'énergie que Mayer venait de révéler. Il présenta en 1855 à l'Académie une machine constituée d'un disque de cuivre mis en rotation à grande vitesse par une manivelle, entre les pôles d'un électroaimant. Plus le disque tournait vite et plus le courant dans l'électro était important, plus le disque chauffait et l'opérateur peinait pour tourner la manivelle. La photo (o) est celle d'une machine semblable conservée au Musée Ampère. Cette expérience a conduit à donner, en France seulement, le nom de Foucault à ces courants induits découverts par Faraday pour expliquer les rotations d'Arago. Bizarre, au lieu de les appeler courants d'Arago !



À l'étranger, ces courants sont simplement *tourbillonnaires* : *eddy current* ou *wirbelstrom*.

Rappelons que Léon Foucault est surtout resté célèbre pour avoir donné la preuve expérimentale de la rotation de la terre, en suspendant un pendule à la voûte du Panthéon (1851)

Ampère et Faraday

Savants modestes et sans ambition personnelle, Ampère et Faraday avaient des qualités intellectuelles très différentes, mais complémentaires.

Leur vie privée, leur parcours scientifique ont été aussi très différents, mais ils partageaient la même passion, explorer et comprendre un aspect particulier de la Nature, celui que Maxwell a ensuite dénommé l'électromagnétisme.

Ils s'estimaient mutuellement, sans aucun esprit de compétition malgré les traditionnelles animosités franco-anglaises sur les plans politique et militaire, lesquelles se répercutaient souvent dans le domaine scientifique. Leurs correspondances en témoignent :

En 1822, Ampère écrivait à Faraday «La chimie et la physique ont toutes deux été honorées par vos travaux, et je vous dois beaucoup personnellement pour vos expériences sur les rotations électromagnétiques.» En 1825 Faraday lui écrivait «En ce qui concerne votre théorie, elle devient vite mathématique, de sorte qu'elle se trouve rapidement hors de ma portée...»

Même si Faraday ne pratiquait pas l'écriture mathématique, il raisonnait intuitivement en mathématicien comme l'a noté Maxwell en 1863 dans la préface de son *Traité* : « A mesure que j'avais dans l'étude de Faraday, je voyais que sa méthode de concevoir les phénomènes était en réalité mathématique, bien qu'elle ne fût pas exprimée sous la forme conventionnelle des symboles de l'analyse.»

Ces deux cerveaux ont fait faire chacun un grand bond en avant à la science, par la découverte de deux effets fondamentaux et réversibles de l'électricité :

– **Ampère** a d'abord sur le plan théorique démontré que le magnétisme n'était qu'un effet particulier de l'électricité, l'**électromagnétisme**. Il a ensuite démontré puis calculé comment le courant électrique d'un circuit produisait des forces mécaniques sur celui d'un autre circuit ou un aimant, donc la possibilité d'un travail mécanique, principe de tout **moteur électro-mécanique**, tel le premier, la *roue de Barlow*.

L'énergie électrique peut se transformer en énergie mécanique.

– **Faraday** a démontré qu'une variation du courant dans un circuit induisait une force électromotrice dans un autre circuit proche, le principe du **transformateur**, qui se révélera plus tardivement l'outil indispensable du courant alternatif. Parallèlement, le mouvement mécanique d'un circuit ou d'un aimant engendrait dans un circuit proche une force électromotrice d'induction, c'est-à-dire le principe de tout **générateur mécano-électrique**, tel le premier, le *disque de Faraday*.

L'énergie mécanique peut se transformer en énergie électrique.

Aux électriciens et praticiens, le long et laborieux travail de développer, à partir de ces deux principes, moteurs, générateurs et transformateurs. Un demi-siècle fut nécessaire.

Compléments

1 - La Nature est souvent rétive à une **symétrie** totale. Ainsi dans le domaine, objet de notre étude, l'électricité et le magnétisme ne sont pas des phénomènes totalement symétriques et réversibles. L'homme et la femme sont-ils vraiment symétriques ? On dit que la différence serait surtout dans la tête.

J. J. Thomson découvrira en 1897 la particule élémentaire d'électricité négative, l'électron, mais une particule d'électricité positive découverte 50 ans plus tard, le positron, n'a pas les mêmes propriétés symétriques. De plus, aucune particule élémentaire magnétique n'a été encore découverte ; heureusement, sinon toute la construction de l'électromagnétisme serait à repenser, d'Ampère à aujourd'hui.

De même, nous verrons que dans les transformations d'énergie électrique sous d'autres formes, la chaleur est une forme d'énergie singulière, dite dégradée, ses transformations étant difficilement réversibles.

2 - La photo illustre l'expérience en fonctionnement réel, conçue par Robert Moïse, ancien conservateur du Musée Ampère (1936-1975), présentée avec des dizaines d'autres aux lycéens lyonnais, au **Musée Ampère** de Poleymieux –voir complément 12 du chapitre précédent.

Le mémoire, *Recueil d'observations électrodynamiques*, était paru dans Bibl. univers. de Genève, sept. 1822.

3 - *Évident mon cher Watson, qu'un anneau de fer marcherait bien mieux qu'un manche en bois!* pense sans doute le lecteur aujourd'hui. L'histoire des sciences est souvent comme un thriller, ou l'on a envie de souffler au héros ce qu'il doit faire ou éviter !

4 - On conçoit que cette propriété de l'auto-induction va poser de sérieux problèmes aux électriciens, lorsqu'ils découvriront **le courant alternatif**, qui par définition croît et décroît, en changeant de sens une centaine de fois par seconde.

5- La **polarisation de la lumière** avait été découverte par Louis Malus en 1809. Le physicien écossais William Nicol remarqua que la réalisation d'un prisme en spath d'Islande (Co_3Ca) permettait de bien séparer le rayon incident en deux rayons de lumière polarisée ; d'où le nom de ce prisme, un nicol.

Le lecteur perspicace constatera sur la figure 1, expérience de l'effet Faraday, un anachronisme : la source de lumière est une lampe à pétrole. Or l'éclairage au pétrole ne se diffusa qu'après 1870 ; Faraday utilisa probablement une chandelle de cire, objet domestique sur lequel il rédigea un véritable traité de vulgarisation chimique peu connu :

A course of Six lectures on the chemical history of a candle, ed. Crookes, 1861. Traduction française de H. Sainte-Claire Deville : *Histoire d'une chandelle*, ed. J. Hetzel, 1868.

6 - Les supraconducteurs sont par essence **diamagnétiques**, d'où leur propriété de lévitation magnétique, c'est à dire "flotter" au-dessus d'un champ magnétique.

7 - Le lecteur peut consulter sur l'URL gallica.bnf.fr les *Experimental Researches* de MICHAEL FARADAY, ainsi que leur traduction française.

– *Experimental Researches in Electricity*, vol. I, II, III, Richard a. J.E. Taylor, 1844, 1847.

– *Experimental Researches in Chemistry and Physics*, Taylor a. Francis, 1859.

– *A course of 6 lectures on the various forces of matter and their relations*, ed. W. Crookes, 1861





La conservation de l'énergie

Rumford, dans les ateliers de l'arsenal militaire de Munich, en 1798, appelle l'attention sur la transformation du Travail mécanique, exigé par le forage des canons, en Chaleur.

6 - Lois et théories

La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne.
La pratique, c'est quand tout fonctionne,
et que personne ne sait pourquoi.
Quand on réunit théorie et pratique : rien ne fonctionne plus...
et personne ne sait pourquoi.

Albert Einstein

La nature de l'électricité

Au cours du siècle précédent, celui de l'électrostatique, on avait beaucoup philosophé pour définir le fluide électrique. Chacun avait son idée, mais incapable de la démontrer expérimentalement. Il apparaissait surtout comme un élément présent dans les corps conducteurs et se divisait en deux parties par l'électrisation, le positif et le négatif.

Ces spéculations n'avaient qu'un intérêt fort limité, la physique de l'électricité s'est d'abord construit avec des expériences et un peu de mathématiques, puis en fabriquant des machines, pas avec des théories aléatoires, invérifiables expérimentalement (0).

L'apparition de la nouvelle électricité dynamique en 1800, avec la pile, n'avait rien apporté de neuf sur le sujet, mais plutôt des complications.

En 1813, le traité de physique du Professeur Antoine Libes précisait modestement:

« De la nature du fluide électrique.

L'analyse et la synthèse sont les seuls moyens qui puissent nous conduire à connaître la nature des corps, et le fluide électrique s'est refusé jusqu'ici à l'activité de nos efforts, pour le soumettre à ces épreuves. Nous ne pouvons donc offrir dans l'état actuel de nos connaissances, que des conjectures très hasardées sur la nature d'un fluide dont l'existence même repose sur des preuves qui sont loin d'atteindre cette rigueur et cette sévérité que la Physique moderne réclame. »

Ampère avait tenté en 1820 de définir le courant comme un phénomène mécanique ou hydraulique : « Les courants dont je vous parle vont en s'accéléralant jusqu'à ce que l'inertie des fluides électriques positifs et négatifs et la résistance qu'ils éprouvent par l'imperfection même des meilleurs conducteurs fassent équilibre à la force électromotrice, après quoi ils continuent à vitesse constante tant que cette force conserve la même valeur. »

Ce n'était pas loin de la réalité ! Il proposait une explication qualitative pour la circulation des courants, sans encore la chiffrer.

Le fluide voltaïque ou galvanique avait des similitudes avec le fluide calorique. Le chimiste Robert Hare de Pennsylvanie contestait que le galvanisme soit un mouvement moléculaire mais un mélange des fluides calorique et galvanique, dont l'un était prédominant en fonction du type de source (1).

Ce rapprochement de nature entre les deux fluides fut ensuite la base du raisonnement qui amena Ohm à proposer pour le fluide électrique une loi de circulation, simple transposition de celle de la chaleur, proposée dans la théorie de Joseph Fourier

Jusqu'en 1865, on se contentait d'une simple extension de l'ancienne théorie des deux fluides de l'électrostatique, adaptée à la nouvelle électricité dynamique qu'elle soit produite par la pile ou les premières machines, après 1831.

Le traité de Physique des professeurs Boutan et d'Alméida de 1861 précisait :

« Les deux électricités de noms contraires dont les pôles sont chargés, provoquent un mouvement continu des deux fluides à travers le fil. Deux courants d'électricité se meuvent en sens contraire : l'un de fluide négatif cheminant du pôle négatif au pôle positif, et l'autre de fluide positif marchant en sens inverse. Quand il s'agit de désigner ces deux courants, qui sont toujours simultanés, on se contente de nommer seulement le courant d'électricité positive et c'est celui-là qu'on appelle en un mot le courant. On dit que le courant dans un fil va de P à N comme l'électricité positive. »

L'explication, inexacte pour les conducteurs solides, était étonnamment juste pour les liquides électrolytes, comme pour les gaz ionisés et les plasmas constituant l'arc électrique.

Le terme de *conflit électrique*, désignant le courant jusqu'à Ampère, sous-entendait que dans ce conflit entre deux courants inverses, l'un d'eux, le positif, était le gagnant. Cela a dû provoquer quelques perplexités quand apparut occasionnellement le courant alternatif, c'était alors quatre courants s'entrecroisant.

Peu importe, pendant un siècle les inventions électriques ne nécessitaient pas de connaître la nature de l'électricité. Elles se développaient en parallèle avec des vitesses un peu trop rapides pour que des théoriciens les expliquent.

Circulation du courant

L'électricité circule d'une façon différente dans les métaux, les liquides électrolytes ou les gaz ionisés.

- Dans les métaux

Le courant électrique dans les métaux, généralement cristallisés, est constitué d'un flot d'électrons dits libres, circulant anarchiquement entre les atomes neutres ou ionisés positivement, lorsqu'ils ont perdu cet électron négatif devenu libre. De chaque atome s'échappe facilement 1, parfois 2 électrons périphériques, par l'agitation thermique et les collisions qu'elle entraîne.

Lorsqu'une tension est appliquée entre les deux extrémités du fil, ce champ électrique provoque le déplacement des électrons dans un sens. Il s'agit d'un déplacement « moyen », car les électrons libres se déplacent naturellement à grande vitesse, d'une façon totalement désordonnée.

Si l'on met des chiffres sur ces faits, les électrons libres s'agitent à plus de 1000 km/s à température normale, mais avec un courant d'un ampère, la fourmilière d'électrons ne se déplace globalement qu'à la vitesse moyenne d'un cm par minute, ce qui représente le passage de 6 milliards de milliards d'électrons. Lorsque l'on dit que l'électricité se propage à une vitesse proche de celle de la lumière, 300 000 km/s, ce n'est donc pas la vitesse des électrons mais celle de la propagation du champ dans le milieu environnant le conducteur. En courant alternatif, les électrons oscillent simplement.

- Dans les électrolytes liquides : il y a dissociation du soluté en anions et cations. Les premiers, porteurs de charge négative circulent dans le sens inverse du courant (conventionnel), les cations dans le sens direct. En un point donné, l'électrolyte est neutre, il y a autant de charges positives que négatives.

Dans les nerfs, l'électricité circule aussi par l'intermédiaire des ions.

- Dans les gaz ionisés : tous les corps sont gazeux au-dessus de 3 à 4000°, ils constituent un plasma conducteur, ou arc électrique, dans lequel circulent en sens inverse les électrons, émis par la cathode ou arrachés par chocs aux atomes du gaz, et dans l'autre sens, les ions positifs ayant perdu un, ou plusieurs électrons. La charge d'espace moyenne dans la colonne d'arc est

nulle, il y a, à un instant, en un point, autant d'électrons que d'ions. Mais les électrons beaucoup plus légers sont bien plus rapides et transportent presque la totalité du courant (à l'inverse du sens conventionnel), les ions transportant dans l'autre sens un très faible courant.

Deux nouveaux aspects de la nature de l'électricité ne furent découverts qu'à la fin du siècle :

Les ondes électromagnétiques

Leur existence a été révélée par les travaux mathématiques de Maxwell entre 1864 et 1873 (V-3). Ils n'eurent aucune influence immédiate sur le développement des applications de l'électricité-énergie. Leur découverte par Lodge et Hertz en 1888 déclencha en moins de 10 ans l'irruption d'une application majeure de l'électricité-information, la Télégraphie Sans Fil ou TSF, suivie des multiples évolutions que l'on sait.

L'électron

La réalité de la charge électrique élémentaire fut découverte par J.J. Thomson en 1897. Elle permit une première application importante dans l'invention de la lampe triode à vide par Lee de Forest en 1906, composant essentiel dans le domaine de l'électricité-information, pour la radio, puis le tube cathodique pour la TV (V-6).

Mais surtout, ce fut au début du XX^e siècle la conception atomique de la matière.

La résistance

Cette propriété élémentaire de tout conducteur était beaucoup plus envisageable par le bon sens que la capacité et l'inductance, précédemment évoquées. Il allait de soi que la circulation d'un fluide dans un fil métallique devait subir un certain freinage, suivant le matériau du conducteur, son *pouvoir conducteur*, ou bien l'inverse sa *résistance à la conductibilité*.

Humphry **Davy** fut le premier, en 1821, à définir expérimentalement la résistance :

« La variation de courant produite par deux conducteurs de même substance, introduits successivement dans le même circuit est la même lorsque leurs longueurs et sections sont dans le même rapport ».

Il en déduit la résistance : $r = c \cdot l / s$

Elle est fonction de la longueur **l** et de la section **s**. Le terme **c** exprime ce que nous appelons la résistivité, caractéristique propre de chaque métal conducteur. L'unité de résistance aurait dû être le *Davy*.

Barlow et Becquerel (1825), Pouillet (1828), Henry (1831) ont abouti aux mêmes conclusions quelques années plus tard.

Charles Wheatstone améliora en 1843 un schéma permettant de mesurer avec précision une résistance à partir de trois autres résistances connues, dont l'une étalon, le célèbre *pont de Wheatstone*.

Loi de circulation des courants - Pouillet

Dans l'esprit des physiciens, elle devait être analogue à celle de l'eau dans une conduite.

Volta avait défini la *force électromotrice* de la pile qui « mettait en mouvement » le fluide électrique dans les conducteurs.

Ampère avait défini l'*intensité* du *courant* circulant dans ces conducteurs. Davy avait défini la *résistance* des conducteurs, freinant la circulation du courant suivant leurs natures. Il ne restait plus qu'à formuler leur dépendance.

Au delà d'une phase transitoire de croissance du courant, on pensait que l'équilibre s'établissait entre la force électromotrice et quelque chose dépendant à la fois du courant et de la résistance.

Restait à passer du qualitatif au quantitatif, mais pour faire expérimentalement ce chiffrage précis, il fallait disposer d'une source de force électromotrice constante, ce qui n'était pas le cas des premières piles, de même un appareil de mesure plus précis pour l'intensité que le galvanomètre de Schweigger.

Après les essais de Davy, Becquerel puis Barlow, ce fut Claude Mathias **Pouillet**, professeur à la Sorbonne, qui entreprit des expériences plus approfondies sur ce thème en 1828. Dans son montage, la source est une pile thermoélectrique (2), plus constante qu'une pile classique, dite hydroélectrique (a2). Il retrouva d'abord la définition de la résistance d'un conducteur :

« *L'intensité du courant est en raison inverse de la longueur du circuit et en raison directe de sa section.* »
Puis il énonça la loi expérimentale :

« Le produit de la résistance du fil interpolaire par l'intensité correspondante du courant est un nombre constant pour le même élément. »

$$R \cdot i = E$$

La constante E étant la force électromotrice de l'élément de pile. Il étendit la formule à plusieurs piles en série et introduisit leur résistance interne r :

$$I = E / (R + r)$$

Formule qui s'appellera la *loi d'Ohm*, quelques années plus tard.

Il communiqua son mémoire à l'Académie et dans son *Traité de physique* de 1831.

Ces expériences nécessitaient un appareil de mesure de l'intensité plus perfectionné que le multiplicateur de Schweigger, même amélioré par Nobili. Pouillet conçut alors sur une idée de La Rive, la "*boussole des sinus*" avec une variante, la *boussole des tangentes* (1825), dont on peut apprécier l'esthétique (b). C'était l'ancêtre du galvanomètre à cadre mobile.

En 1831, l'allemand Fechner fit des expériences semblables, mais ses résultats obtenus avec des piles classiques peu constantes étaient incertains.

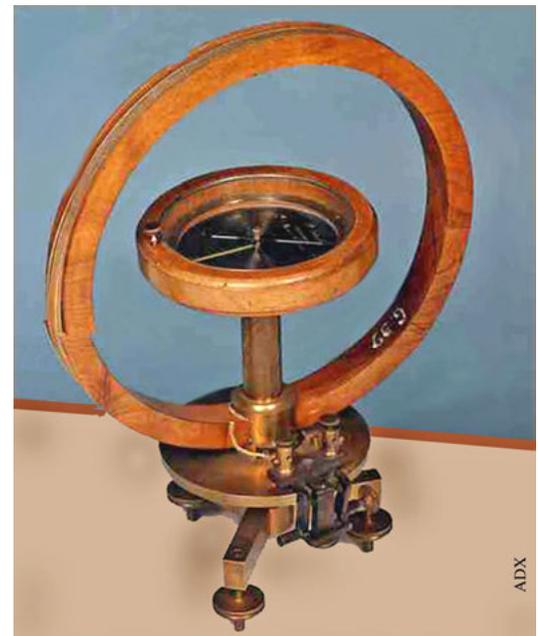
L'antériorité, la loi d'Ohm

Vers 1840, des scientifiques allemands, dont Gauss, eurent connaissance d'un mémoire de Georg Ohm, professeur à Nüremberg, publié en 1827 : « *Théorie mathématique du circuit galvanique* ». Mais ce travail était resté inconnu, même en Allemagne.

En une centaine de pages, Ohm présentait une théorie très générale (huit *classes* ou cas) de l'établissement en régime variable, puis du régime permanent, de l'électricité fournie par des piles dans un circuit *formé d'un nombre quelconque de parties*, avec des conducteurs de formes diverses, plates, annulaires ou prismatiques.



a2 Pile thermoélectrique de Pouillet



b Boussole des tangentes Pouillet

Il arrivait à des équations différentielles, transposition à l'électricité de celles établies pour la chaleur par Fourier. La température devenait une *force électroscopique* ; la tension, le flux de chaleur ; une *quantité de courant*, l'intensité ; la conductibilité thermique, la *conductibilité électrique*. La comparaison était intéressante, mais n'était qu'une analogie.

Au milieu d'un certain fatras de considérations générales, on trouve une seule page sur un cas particulier : « *L'intensité du courant S dans une partie homogène du circuit est égale au quotient que l'on obtient en divisant par la longueur réduite L (résistance équivalente) de cette partie, la différence de tension A qu'elle présente à ses extrémités* » :

Cette formule (c) théorique était basée sur l'hypothèse que l'électricité dynamique circulait comme la chaleur.

Von den vielen aus der allgemeinen Gleichung

$$S = \frac{A}{L}$$

 sich ergebenden besondern Eigenthümlichkeiten
 der galvanischen Kette will ich hier nur einige
 wenige anführen. Man sieht sogleich, dass eine

C Ohm's Law, from die Galvanische Kette

Joseph Fourier venait en effet de publier en 1822 la célèbre *théorie analytique de la chaleur*, qui en était la mise en équation, signant ainsi l'abandon de ce mystérieux fluide, le *calorique*. Quelques physiciens pensaient déjà qu'un autre fluide aussi mystérieux, le fluide galvanique pouvait avoir le même comportement. Ce fut le cas de G. Ohm qui assimilait celui de l'électricité à celui de la chaleur.

Encore un exemple de déduction juste, dans un cas particulier, à partir d'un raisonnement global et théorique erroné. Comme si Coulomb avait théoriquement déduit de la gravité ses lois d'attractions magnétiques et électriques, qui suivaient une loi analogue.

La théorie d'Ohm définissait aussi la chute de tension entre deux points d'un circuit.

Comme toute théorie, il était indispensable de la confirmer expérimentalement, Ohm ne fit aucune tentative. C'était inutile puisque Fechner l'avait tenté imparfaitement en 1831, et Pouillet l'avait confirmé avec précision, plusieurs années avant que soit connu le mémoire d'Ohm en 1840. La Royal Society s'empressa cependant de décerner à Ohm la médaille Copley de 1841 ; peut-être pour éviter de reconnaître le travail précis et approfondi de Mathias Pouillet, qui ne dépassa guère les frontières françaises. La traditionnelle rivalité anglo-française !

Pendant deux décennies, les traités de physique français expliquaient l'électrocinétique avec les expériences de Pouillet, citant la théorie d'Ohm qui se trouvait ainsi vérifiée. La dénomination de *loi d'Ohm* s'imposa surtout après l'adoption au Congrès de 1881 de l'*ohm* comme unité de résistance, résultat de marchandages entre susceptibilités nationales, alors que cette unité aurait du être logiquement le *davy*.

Ohm, mort en 1854, aurait été le premier surpris de cette gloire, ce mémoire ayant été son seul travail occasionnel dans le domaine électrique, uniquement dans le but d'accéder à la chaire professorale qu'il espérait, et finit par obtenir tardivement pour un autre motif (3).

Il ne fit ensuite aucune autre recherche dans le domaine électrique.

Lois de l'électrocinétique

Les calculs de circulation du courant dans les réseaux plus complexes utilisent deux autres lois complémentaires à la loi d'Ohm :

- Les *lois de Kirchhoff*, loi des noeuds et loi des mailles (1845) ;
- Le *théorème de Thévenin* (1883).

Sans avoir encore compris la nature de l'électricité, on en savait assez pour la produire avec des machines mécano-électriques et l'utiliser avec les moteurs électro-mécaniques, pour l'éclairage et autres applications.

Mais lorsque le courant alternatif se révéla vers 1890 la forme d'électricité incontournable ; ce fut très laborieux d'en comprendre les lois, en découvrant que l'inductance et la capacité y jouaient un rôle bien plus complexe que la résistance. Dix années furent nécessaires à ces patientes découvertes partielles, dont l'ensemble constitue le corpus de l'électrotechnique (1885/95), (IV-3).

La conservation de l'énergie

Le terme *énergie* ne fut utilisé qu'à la fin du siècle, bien que Rankine l'ait créé vers 1860 en reprenant le terme grec *énérgia* signifiant la force. Jusque-là l'énergie était précisément la *force*, c'est-à-dire la *capacité de travail* mécanique.

Plusieurs fois évoquée dans les pages précédentes, l'énergie concerne tous les domaines de la physique, autres que l'électricité. Son importance était capitale pour les développements électriques, quand les physiciens découvrirait que l'électricité c'était beaucoup plus qu'un phénomène ayant des effets chimiques, thermiques ou physiologiques, mais une forme particulière d'énergie. Car elle ne peut s'obtenir que par conversion d'une autre énergie, et n'être utilisée que sous une autre forme.

Pressentie depuis longtemps (gravure au début du chapitre), la révélation, en 1842, de l'équivalence entre la chaleur et le travail mécanique, qui précédait le principe de conservation de l'énergie, est parfois considéré comme l'événement le plus important de l'histoire de la physique (5).

Elle étend à l'énergie le principe de Lavoisier, énoncé pour la chimie en 1786 :

« **Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme.** »

Au moins six scientifiques sont intervenus, dans la première moitié du siècle, sur le problème de la conservation de l'énergie ; leurs apports individuels et quelques controverses productives ont fondé la **Thermodynamique**, nouvelle branche scientifique régissant les transformations réciproques de la chaleur avec d'autres formes d'énergie, en particulier l'énergie mécanique.

Il paraît surprenant que ce soit un médecin et non un physicien, Robert **von Mayer**, qui le premier énonça le principe de la conservation d'énergie, pour expliquer des phénomènes biologiques. Lavoisier avait déjà suggéré que la chaleur du corps résultait de l'oxydation des aliments pour être ensuite distribuée dans les muscles par le sang.

Pourtant nombre d'humains devaient se poser la question, comment les espèces du règne animal arrivaient à transformer la nourriture plus l'air respiré en travail et chaleur.

Le terme *énergie* était alors inconnu en physique ; on n'exploitait qu'une seule forme d'énergie, le travail mécanique produit par la force de l'homme et surtout celle du cheval. En reconnaissance à cet ancestral générateur d'énergie, l'unité de puissance de la machine à vapeur qui le remplaçait fut longtemps le cheval-vapeur.

En voyage à Java, Mayer remarque que le sang des habitants des tropiques était moins rouge que celui des Européens ; il transportait moins d'oxygène, l'apport de chaleur au corps étant plus réduit. Cela le conduisit à réfléchir sur la chaleur transformée en énergie mécanique par les muscles.

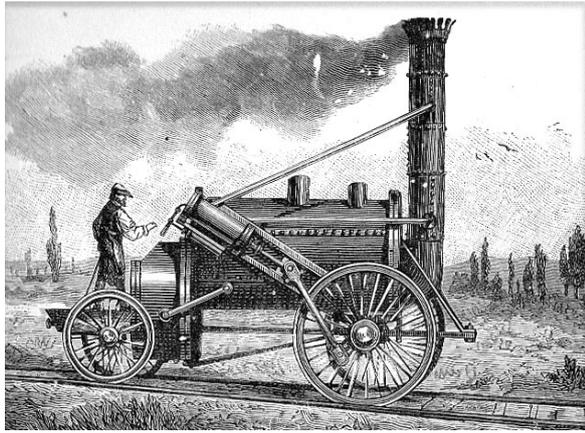
Dans son mémoire, *Remarques sur les forces inanimées de la Nature*, publié en mai 1842, il déterminait expérimentalement l'équivalence de l'énergie mécanique avec la chaleur,

– soit 0,365 kg.m pour une calorie, exactement 0,427 soit 4,18 Joules.

Plus tard, en 1845, il développait dans un mémoire le principe de conservation de l'énergie, qui deviendra ensuite le premier principe de la Thermodynamique :

« **L'énergie n'est ni créée, ni détruite, elle se transforme.** »

À cette époque, le premier problème était de comprendre, et si possible calculer, la relation entre la chaleur fournie par le charbon à la vapeur et l'énergie mécanique développée par les moteurs à vapeur (d).



d La Fusée de Stephenson - 1829

La chaleur était un fluide mystérieux, le *calorique*, jusqu'à la publication en 1822 de la *Théorie analytique de la chaleur* où Joseph Fourier développe les équations de propagation de la chaleur.

Un jeune physicien français, **Léonard Sadi Carnot** avait publié en 1824 : *Réflexions sur la puissance motrice du feu et les machines propres à développer cette puissance*. Le mémoire tiré à peu d'exemplaires était passé inaperçu. Redécouvert plus tard, on y trouvait l'énoncé d'idées très nouvelles :

« Partout où il existe une différence de température, il peut y avoir production de force motrice... Ainsi nous sommes conduits à établir la proposition générale que voici : La puissance motrice

de la chaleur est indépendante des agents mis en œuvre pour la réaliser ; sa quantité est fixée uniquement par les températures des corps entre lesquels se fait en dernier résultat le transport du calorique. »

Il établissait qu'il était impossible de faire fonctionner une machine thermique à partir d'une seule source, il fallait une source chaude et une source froide et le rendement R , c'est-à-dire l'énergie mécanique W obtenue à partir de la quantité de chaleur Q était

$$R = W/Q$$

La chaleur inutilisée, perdue, allait à la source froide.

Tel était le *principe de Carnot* qui devint le *deuxième principe de la thermodynamique*, nouvelle science qui sera approfondie par les acteurs suivants.

Les moteurs thermiques de l'époque avaient un rendement de 5 à 10%, les dernières locomotives à vapeur des années 1950 n'utilisaient que 12% de la chaleur du charbon, les grandes centrales thermiques actuelles ont un rendement global atteignant 42 à 45 %, le reste, plus de la moitié, peu récupérable en raison de sa trop faible température étant dissipée dans l'air, la mer ou les fleuves.

Sadi Carnot mourut du choléra à 36 ans, en 1832 (6), on retrouva dans ses papiers en 1878 qu'il avait aussi envisagé le principe de la conservation de l'énergie, qui devint ensuite le *premier principe de la Thermodynamique*.

Pour les électriciens, le nom de **James Prescott Joule** est associé à la loi (1841) bien connue définissant la quantité de chaleur Q dégagée par le passage d'un courant I dans une résistance R , pendant un temps t :

$$Q = k. R.I^2. t$$

Ce physicien anglais monta des expériences méticuleuses pour trouver l'équivalence de la chaleur avec l'énergie mécanique. En traduisant les unités en pieds livres dans notre système SI, ou le travail s'exprime précisément en joule, il trouva 4,51 joules par calorie, assez proche du 4,18 exact. Les mesures calorimétriques sont souvent très délicates.

Il démontrait, sans le savoir, ce que Carnot avait écrit quelques années plus tôt : « La chaleur n'est autre chose que de la puissance motrice... qui a changé de forme. Partout où il y a destruction de puissance motrice, il y a, en même temps, production de chaleur en quantité précisément proportionnelle à la quantité de puissance détruite.

Réciproquement, partout où il y a destruction de chaleur, il y a production de puissance motrice. »

En 1847, il rencontre William Thomson et s'associe à lui pour préciser le deuxième principe de la Thermodynamique que Clausius venait de découvrir par hasard dans le livre oublié de Sadi Carnot. Il contribue à ce que le *fluide calorique* des anciens chimistes devienne la chaleur, forme particulière d'énergie s'expliquant par l'agitation des *molécules* de matière.(7)

William Thomson proposa une nouvelle échelle de température absolue qui transforme le rendement du deuxième principe de Carnot en :

$$R = 1 - T_2 / T_1$$

La source chaude ayant la température T_1 , la source froide T_2 . Ces températures absolues s'expriment en **degré Kelvin** (0 °K équivalent à -273 °C), sir William Thomson ayant été anobli en Lord Kelvin.

Rudolf Clausius, physicien prussien, participa activement aux débats accompagnant l'élaboration de la thermodynamique. Il la codifia et introduisit en 1865 un nouveau concept pour préciser la notion de réversibilité, *l'entropie S*, terme issu du grec, signifiant transformation.

Dans un système fermé, l'entropie mesure l'accroissement d'énergie dégradée dans une transformation, peu récupérable, dans son état de désordre. Dans une transformation parfaitement réversible, l'entropie du système n'augmente pas. L'énergie de l'univers est constante, mais son entropie augmente. Plus tard le physicien ingénieur écossais **Rankine** fit aussi d'importants travaux, en particulier sur l'amélioration du condenseur des machines à vapeur, avec son *cycle de Rankine*.

L'importance de la conservation de l'énergie dans les phénomènes électriques a été précisée par **Hermann von Helmholtz**. Ce physiologiste pluridisciplinaire publia en 1847 *La conservation de la force*, où sont développées des avancées pour comprendre l'électrodynamique. Avec Thomson, en 1848, il mit en évidence comment le courant d'induction ne peut s'expliquer qu'avec le principe de conservation de l'énergie mécanique en énergie électrique

Par exemple, l'introduction par un opérateur d'un aimant dans une bobine génère un courant dans celle-ci, l'énergie véhiculée par ce courant résulte de la transformation de l'énergie mécanique fournie par l'opérateur. Celui-ci peut sentir une légère résistance à cette introduction, qu'il n'aurait pas perçue si le circuit de la bobine était resté ouvert. Faraday travaillant à trop petite échelle, ne pouvait pas se rendre compte du travail de cette force mécanique converti en courant induit.

De même, dans la conception de sa pile, Volta n'arrivait pas à comprendre son erreur, le contact entre deux métaux qui produit une tension ne peut pas générer un courant, c'est-à-dire une énergie, laquelle ne peut résulter que de la transformation d'une autre énergie, chimique dans le cas de sa pile.

Et pourtant, **Démocrite** avait énoncé ce principe depuis deux millénaires : « **Rien ne peut sortir de rien. Rien de tout ce qui existe ne peut être détruit.** Tout changement est dû, soit à la combinaison, soit à la séparation des molécules. »

Tous les générateurs électromécaniques d'électricité à venir transformeront en énergie électrique, l'énergie mécanique fournie par un moteur, le plus souvent thermique, suivant cet incontournable principe de la conservation de l'énergie.

Sauf découverte très improbable, il n'y a pas aujourd'hui de nouvelles énergies à découvrir, comme les médias l'espèrent, seulement d'improbables nouvelles transformations d'une énergie en une autre, plus pratique à transformer en électricité.



Mais qu'est-ce que c'est l'énergie ? Nous n'en connaissons toujours pas la nature. Quelle drôle de science que la physique qui repose sur une entité indéfinissable !

Le bon sens commun a du mal à réaliser qu'un système contenant une grande quantité de chaleur (calories) n'est pas nécessairement très chaud (température). Comme pour le Gulf Stream (f), l'eau de

refroidissement du condenseur de vapeur, à la sortie d'une centrale thermique, évacue plus d'énergie calorifique perdue que les alternateurs d'énergie électrique, mais à une température trop faible pour même chauffer l'hiver une ville voisine.

Les théoriciens, à la recherche de la nature de l'électricité

Comme pour toute science en marche, pendant que les uns découvraient et inventaient, d'autres essayaient de comprendre la nature profonde de l'électricité.

Après la découverte de l'électromagnétisme, d'abord avec la force d'Ampère, puis l'induction de Faraday, déclenchant nombre d'applications, moteurs et générateurs, les théoriciens, s'attelèrent à approfondir ces découvertes et rechercher une autre explication que les actions à distance de Newton. Citons simplement ces travaux, sans approfondir leur gestation, nécessitant de longs développements

Faraday consacra des années, après sa découverte, à trouver une explication à l'induction, plus acceptable que l'action instantanée newtonienne. Il y parviendra par intuition avec sa conception des lignes de force, mais sans pouvoir la justifier d'une façon expérimentale, à défaut d'une explication mathématique, hors de ses compétences.

Avec Ampère, puis Maxwell on découvrira que *le langage mathématique est pour la physique celui de la Nature*. Ou tout au moins le moyen presque incontournable de pénétrer ses secrets.

En Angleterre, **William Thomson**, physicien et praticien du télégraphe, fut l'autre chercheur qui fit avancer les problèmes fondamentaux et perçut la nécessité d'un éther pour transmettre les actions électromagnétiques à distance dans sa *Mathematical Theory of Magnetism*.

En Allemagne, plusieurs physiciens et principalement mathématiciens apportèrent chacun des éléments à la compréhension de ce phénomène électrique qui apparaissait plus complexe qu'un autre fluide mystérieux, la chaleur, dont Joseph Fourier paracheva la théorie mathématique.

Le plus connu est précisément celui qu'on surnomma, encore au début du XX^e siècle, *l'illustre Gauss*, **Karl Gauss**, mathématicien d'abord, physicien et astronome, enseignait à Göttingen. Il a travaillé sur l'astronomie, l'optique et la géodésie. Parmi ses nombreuses avancées en mathématiques, on connaît surtout la loi normale de Laplace-Gauss, permettant l'estimation des erreurs dans les travaux de statistiques et probabilités, la bien connue *courbe de Gauss* en forme de cloche. (8)

Dans le domaine de l'électromagnétisme, il a travaillé avec Weber et correspondait avec lui grâce à un astucieux télégraphe à aiguille qu'ils ne songeaient d'ailleurs pas à développer (V-1). Ils ont animé un véritable groupe de recherches sur le magnétisme, la *Société magnétique*, ainsi que la notion de potentiel électromagnétique.

Dans le cadre du Comité britannique des Unités, il a défini les *unités électromagnétiques* basées sur la Longueur, la Masse, le Temps - LMT. Aussi son nom a été adopté comme unité d'induction magnétique.

Wilhelm Weber, physicien, a démontré avec Gauss dans le cadre de la Société citée, qu'il n'existait pas de monopole magnétique, il est impossible d'avoir un Nord sans un Sud. Lui aussi a travaillé sur les unités et conçu le système des unités électrostatiques LMT. L'unité de flux magnétique adoptée plus tard a alors été le *weber*. Ces travaux ont été pour Maxwell la base de sa découverte de l'identité des ondes électromagnétiques et lumineuses.

Il a approfondi les efforts électrodynamiques, remis en question la notion d'attraction à distance de Newton. Il inventa un nouvel appareil de mesure de courant et tension, l'*électrodynamomètre*, qui s'est avéré le seul capable de mesurer, au début, les grandeurs en alternatif. Vers 1890, avant la découverte de l'électron, il proposa un modèle de structure électrique de la matière, le grain élémentaire serait constitué d'un centre de charges positives autour duquel tournait des charges négatives - presque l'atome de Rutherford. L'application d'une tension à un conducteur déclenchait des mouvements entre les particules négatives.

Dix ans plus tard, **Carl Neuman**, mathématicien précisa la force d'Ampère dans une étude générale des forces électriques (9).

Gustav Kirchoff, encore étudiant, précisa les lois de l'électrocinétique, étudiées par Gauss et Weber. Ces lois des nœuds et mailles prirent alors son nom, bien connu des étudiants et électriciens. Ses travaux marquants ont porté sur la loi du rayonnement, la notion de corps noir, la spectroscopie et les raies caractéristiques des corps.

Parmi ces physiciens et mathématiciens, qui ont apporté chacun de nouveaux éléments à la compréhension de l'électromagnétisme, se détache celui qui a réussi la synthèse de toutes ces approches partielles, **James Clerk Maxwell**. L'importance de son apport a été la prédiction mathématique en 1865 d'une nouvelle nature de l'électricité, les ondes électromagnétiques. Deux décennies plus tard ces ondes seront physiquement découvertes par **Rudolf Hertz**, suivies des applications que l'on sait.

Le chapitre V-3 y est consacré.

Avant Einstein, ils pensaient déjà : « Qu'est-ce qui nous pousse à imaginer des théories l'une après l'autre ? » La réponse est simple : « **Parce que nous avons de la joie à comprendre** »

Les autres, les obscurs

Les livres font apparaître que dans l'histoire de l'électricité, comme celle de toutes sciences, il y a plusieurs catégories d'intervenants : les acteurs principaux, découvreurs et inventeurs, dont le travail est assez longuement présenté, et les autres, à peine cités, dont les réflexions et travaux complémentaires moins spectaculaires, ont pourtant aidé, préparé et développé les découvertes des précédents.

Ces centaines d'obscurs sont souvent des amis ou collègues auxquels les « savants » font part de leurs incertitudes, attendant d'eux un certain regard extérieur qui les aiderait. L'un de ces hommes est souvent cité, le physicien suisse **Auguste de la Rive**, il a participé et fait avancer nombre de travaux, sans qu'on puisse lui attribuer une découverte ou invention importante, si ce n'est le condensateur électrochimique.

Il faut aussi y ajouter **les femmes de ces savants**, compagnes dont le rôle était généralement d'aplanir tous les soucis familiaux et matériels qui auraient perturbé les réflexions et expériences de leur conjoint. Elles les soutenaient dans leurs périodes de découragement, jusqu'à participer à leurs travaux comme assistante, et même plus comme partenaire, rôle qu'a tenu Lucia Galvani et certainement bien d'autres. Mais comme cela a été évoqué pour Lucia, la place normale de la femme avant le XX^e siècle était à la cuisine, à la gestion du logis et chargée d'élever les enfants. Pas au laboratoire, comme Marie Curie !

Le plus original des obscurs a été celui qui l'était volontairement, **Henry Cavendish**. Cet anglais excentrique d'une famille célèbre hérita d'une grande fortune accumulée par son oncle aux Indes, surabondante pour ses travaux de physicien et chimiste. Totalemment asocial, il fuyait les femmes et vivait solitaire. Il ne publia que peu de choses. Toutes ses riches notes inconnues ont été archivées pendant 60 ans par la famille, puis découvertes avec la création du célèbre laboratoire Cavendish en 1874, dont le premier directeur fut Maxwell.

On s'aperçut que beaucoup de ses découvertes et résultats avaient précédé ceux des physiciens connus :

– l'identification de l'hydrogène (inflammable air) 10 fois plus léger que l'air, le gaz carbonique.

– mesure avec une balance de torsion de la densité de la terre et la constante de gravitation de Newton

– Les forces électrostatiques, avant Coulomb. Il pressentit les notions de capacité, potentiel, résistance.



H. Cavendish

Malgré le refus qu'on fasse son portrait, présentons le seul que l'on connaisse de ce précurseur.

Supraconductivité (11)

Difficile et ancien problème lié à la résistance électrique, il a été reporté en fin de chapitre, pour signifier qu'il reste toujours imparfaitement compris et appliqué, mais les électriciens veulent rêver que l'espoir n'est pas nul.

Le physicien hollandais **Kammerlingh Onnes** réussit en 1908 à liquéfier l'hélium à la température de un degré au dessus du 0^0 K (-273^0 C) et décide d'explorer le comportement des métaux à cette température, spécialement leur résistance. Normalement elle croît avec la température et devrait décroître en s'abaissant. Pourtant, ce pourrait être le contraire, si les électrons se figeaient, aucun courant ne pourrait circuler.

En 1911, Onnes détecte que le mercure n'a plus aucune résistance, au dessous de -269^0 C, il devient *supraconducteur*. Certains matériaux le deviennent aussi, tel le niobium à 16^0 K, température un peu plus haute, d'autres pas du tout. Ce qui ne simplifie pas les explications du phénomène.

Lorsque l'on soumet un supraconducteur à un champ magnétique supérieur à un champ critique H_c il reprend sa résistance. Onnes reçoit le prix Nobel de 1913, il devient poseur de question, beaucoup cherchent alors une explication.

En 1933, une nouvelle propriété se révèle, le supraconducteur repousse un champ magnétique extérieur, cette *lévitation* est dénommée effet Meissner, nom de son découvreur.

Un premier saut

Après WW2, les recherches reprennent et trois physiciens, Bardeen, Cooper et Schieffer proposent en 1957 une théorie qui paraît répondre à la question, la **théorie BCS**, dite des paires d'électrons, permettant d'espérer d'atteindre une température critique maximale de 30^0 K. Ils sont récompensés par le Nobel.

Des applications spécifiques sont envisagées avec des supraconducteurs à base de plomb et niobium, constituant les enroulements de puissants électro-aimants, refroidis à l'hélium liquide. En 1962, Westinghouse réalisait des supraconducteurs à base de Niobium - titane dont la température critique atteignait 21^0 K.

Le problème

Le talon d'Achille de la supraconductivité reste l'obtention de températures très basses, proches du zéro absolu. Le seul moyen de refroidissement est l'hélium liquide très onéreux à liquéfier. Le rêve serait non pas d'atteindre la température ambiante mais au moins celle de **l'azote liquide, 77^0 K ou -196^0 C**. L'azote liquide étant un sous-produit de la distillation de l'air, vendu à moins d'un euro le litre, moins cher que l'eau minérale.

Les chercheurs n'ont que des voies très étroites : trouver expérimentalement des composés à température critique élevée, en s'appuyant sur une théorie qui évolue, mais n'explique pas encore tout.

Un deuxième saut

Le normand **Bernard Raveau** cherchait vers 1980 des oxydes conducteurs, capables de remplacer les électrodes métalliques de condensateurs, qui s'oxydaient trop en atmosphère et températures particulières. Il trouva des oxydes d'yttrium, lanthane, baryum ou strontium, mais ce sont des céramiques ne conviennent pas pour les application envisagée. On avait observé que la résistivité de ces mélanges, les *phases de Raveau*, diminuait avec la température plus rapidement que prévu. C'est tout.

Un troisième saut - 1986 –

Deux chercheurs d'IBM à Rüschlikon, à côté de Zürich, Alex Müller et Georg Bednorz, fabriquent l'une de ces céramiques, des **cuprates**, à base de lanthane, baryum, cuivre et oxygène, normalement isolante. Elle devient supraconductrice à 30⁰ K. En ajoutant un peu de plomb elle arrive à 58⁰ K. Dans l'Alabama en remplaçant le lanthane par de l'yttrium on atteint l'extraordinaire 91⁰ K, au dessus de l'azote liquide.

Les deux chercheurs suisse et allemand reçoivent le prix Nobel 1987, Raveau est oublié. Une effervescence agite alors tous les laboratoires du monde. Après un pic du nombre de publications en 1990, la décroissance est rapide et tomberait vers zéro en 2015, sauf si... un quatrième saut ?

Applications (en 2010)

Tous les électriciens rêvent à la supraconductivité comme à un Nirvana où la résistance et ses pertes n'existeraient plus. Malgré les coûts prohibitifs actuels, des prototypes et machines opérationnelles sont construites:

- Les premiers bobinages supraconducteurs, générateurs de champs magnétiques très élevés ont équipé plusieurs grands accélérateurs de recherche fondamentale, tel que le LHC à côté de Genève.

- Le projet ITER du réacteur de fusion nucléaire repose totalement sur cette technologie

- Des prototypes d'alternateurs à inducteurs supraconducteurs sont construits dans plusieurs pays, mais l'augmentation de puissance unitaire qui les justifierait économiquement et techniquement n'est pas envisageable. Pour l'imagerie médicale, l'IRM allie des champs magnétiques très puissants obtenus avec des bobines supraconductrices et une informatique sophistiquée.

- Un système de train à grande vitesse non classique, le *Maglev*, a fait l'objet de plusieurs prototypes. Sans contact avec la voie, il est suspendu au dessus par lévitation électromagnétique, avec des électro-aimants supra-conducteurs.

- Des câbles supraconducteurs, longs de 600 m, véhiculent 5000 A, une énergie cinq fois plus grande que le cuivre

- Le stockage d'énergie dans de grandes inductances supraconductrices, reliées au réseau par des onduleurs (II-5, c6)

- Des limiteurs de courant, simples tronçons de supraconducteurs en régime normal sont brusquement rendus conducteurs, donc résistants, par application d'un champ magnétique supérieur au champ critique. Ils remplaceraient les complexes disjoncteurs actuels.

Malgré l'apport de 20 prix Nobel, le développement de la supraconductivité reste limité à des cas spécifiques, bien que des conducteurs, supraconducteurs à la température au mieux de l'azote liquide, serait une innovation d'une portée économique considérable. Tous les matériels électriques, générateurs, conducteurs, moteurs et machines diverses subissent tous la malédiction de l'échauffement, contraignant et coûteux, de toute pièce traversée par le courant électrique.

En résumé, la supraconductivité, découverte il y a un siècle, a été expérimentée et utilisée avec un succès relatif pour des applications très particulières ou le critère de rentabilité n'est pas pris en compte. Selon la méthode classique, on a cherché à mieux en comprendre la théorie pour inventer un matériau répondant au critère de haute température souhaité. Après des recherches intenses trois pistes ont débouché sur des espoirs, malheureusement déçus. Ce qui statistiquement réduit avec le temps, la probabilité d'une réussite.

Compléments

0 – La nature de l'électricité

Le lecteur sera peut-être surpris de la brièveté dans ce livre sur les recherches successives des théoriciens et philosophes de l'époque pour savoir ce qu'était l'électricité. Il a été centré sur l'histoire des découvertes et inventions qui se sont déroulées la plupart sans cette connaissance, acquise seulement dans la dernière décennie du XIX^e siècle (V).

Ces théories ont encore fait l'objet de publications récentes, dont :

GÉRARD BORVON, *Histoire de l'électricité*, ed. Vuibert, Paris, 09/2009.

1 - ROBERT HARE, URL : <http://chem.ch.huji.ac.il/history/hare.html>. Il justifiait sa théorie par des essais d'un appareil, le *Déflagrator*, qu'il avait conçu ; une pile très puissante qui permettait d'obtenir de une très forte chaleur, capable de volatiliser le graphite.

Professor Hare on new Galvanic Apparatus and Theory, American Journal of science, vol. 3, p. 105-117, 1821.

2 - La pile thermoélectrique utilise l'effet Seebeck (1821) : dans un circuit fermé constitué d'une tige de bismuth soudé à des fils de cuivre, si l'on chauffe une jonction et refroidit l'autre, un courant constant circule. (II-2)

3 - Le livre de G.OHM : *Die galvanische kette, mathematisch bearbeitet*, Berlin 1827 avait été traduit en Français : *Théorie mathématique des courants électriques* par J.M. Gauguin, Hachette, 1860. Il est accessible sur URL : gallica.bnf.fr

Les expériences de Pouillet étaient publiées dans :

- Traité de physique, t. I, 2^e part., p.755, 1^e édit, 1828.
- C.R. académie sc., t. XX, p.204.
- Traité de physique, 3^e édit. 1831, C.R. Acad, t. IV, p.267, 1837.
- BECQUEREL, Traité d'électricité, t. V, p.255.

Pourquoi le livre d'Ohm (1787-1854) fut-il oublié pendant 10 ans ?

Ses débuts dans l'enseignement furent difficiles ; en 1817 il est professeur à Cologne et aspire à entrer à l'université de Munich, mais il lui faut faire auparavant un travail reconnu. Son mémoire, appliquant à la circulation de l'électricité les mêmes lois que celle de la chaleur, est rédigé à Berlin en 1826, mais cette thèse est considérée sans aucun intérêt par le ministère, la chaire de Munich lui est alors refusée et il ne retrouve un emploi qu'en 1833 à Nüremberg. En 1835, Gauss reconnaît sa thèse à Goettingen, mais Richtie, Peltier et de La Rive désapprouvent la position de Gauss. Sa théorie étant finalement reconnue intéressante par les scientifiques allemands vers 1840, ce n'est pourtant qu'en 1852 qu'il obtient la chaire de physique de Munich qu'il convoitait depuis des années.

En dehors de la célèbre loi utile qui occupe moins d'une page, tout le livre est une accumulation de propositions assez confuses dont apparemment aucune n'a été envisagée ni vérifiée

« ... toutes les questions relatives à la propagation de l'électricité pourraient être distribuées en huit classes : *État permanent des tensions, Phénomènes de courant : circuit linéaire, 1^e classe —circuit ayant trois dimensions, 2^e classe.etc.* »

Plan semblable pour les circuits de la 4^{ème} à la 8^{ème} classe. Ces développements appliquent trois lois énoncées a priori, dont l'une est basée sur le principe de la pile selon Volta : la force électromotrice apparaît au contact entre deux métaux. Fait abandonné depuis plus de 20 ans.

Les connaissances en électricité de G.Ohm paraissent ainsi superficielles. Pouillet fit une mise au point en 1845 dans le C.R. de l'Académie, t. XX, p.210 : « C'est lui (Ohm) qui a été le premier à poser la question et sans savoir qu'il l'eut posée, j'ai été le premier à la résoudre... Il avait montré le but d'une manière vague par le calcul, je l'ai vu de mon côté d'une manière nette et je l'ai touché par l'expérience. »

Après avoir parcouru le livre assez indigeste d'Ohm, puis le traité de Pouillet, net et clair, on ne peut qu'approuver cette note.

Une longue analyse de la question a été publiée par JÜRGEN TEICHMANN dans la revue ETZ : *150 Jahre Ohmsches Gesetz 1826-1976*, ETZ -a, Bd 97, S. 594/600 et *Zur Entdeckungsgeschichte des Ohmschen Gesetzes*, ETZ-a, Bd. 98, 1977, H.1, S.96-102. Cette étude analyse les apports successifs de Cavendish en 1775, Volta et Ritter en 1802, Davy en 1821, Becquerel et Barlow en 1825.

5 - Les **sciences de la vie** ont à la même époque étendu la loi, *rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme*, à l'origine des transformations biologiques : Darwin en 1859 avec *L'origine des espèces...*, puis Pasteur en 1862 avec *La génération spontanée est une chimère*.

6 - Léonard Sadi Carnot, physicien, était l'oncle de François Sadi Carnot, président de la République, mort assassiné. Tous les boulevards Carnot des villes françaises honorent l'homme politique, pas le physicien.

7 - Le terme **molécule** utilisé avant le XXe siècle, comme celui d'atome, signifiait seulement grain de matière, suivant la théorie de Démocrite. La molécule actuelle est depuis un siècle un assemblage d'atomes.

8- La **courbe de Gauss** est agréablement illustrée dans :

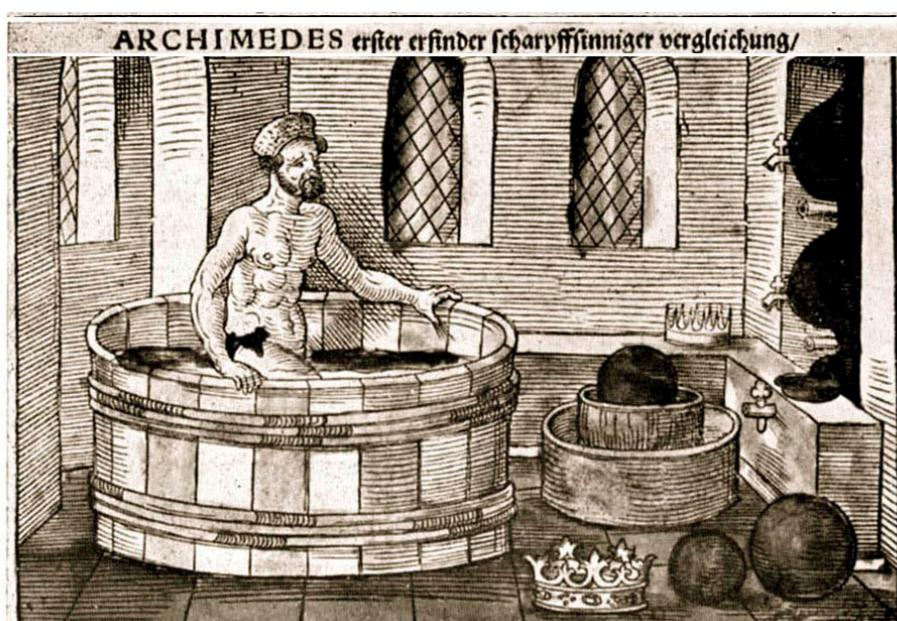
<http://images.math.cnrs.fr/la-courbe-en-cloche.html>

9- Le livre de Carl **Neumann**, *Die Elektrischen Kräfte*, est accessible sur l'URL : gallica.bnf.fr Il développe le calcul de la force d'Ampère.

10 - Supraconductivité

Revue : Nature, CNRS, La Recherche, Pour la Science. Zetschrift für Physik, avril 1986. E. Joe Eck, histoire des supraconducteurs , 2008

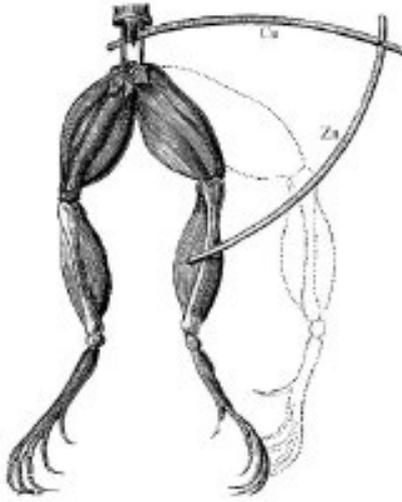
Première loi de la Physique



GRAVURE DU XVI^e SIÈCLE ILLUSTRANT D'UNE FAÇON TRÈS NAIVE LE RÉCIT FAIT PAR PLUTARQUE DE LA DÉCOUVERTE PAR ARCHIMÈDE DE LA LOI PRÉCISANT LA POUSSÉE EXERCÉE PAR LES LIQUIDES SUR LES CORPS QUI Y SONT PLONGÉS.

On distingue, près de la baignoire d'Archimède, la fameuse couronne du roi Hiéron, ainsi que divers objets ou appareils utilisés pour les expériences d'hydrostatique

Instrumentes des grandes découvertes



Il faut regarder avec une certaine émotion ces objets simples et rustiques, conçus par les cerveaux remarquables de quelques hommes, habitués par la passion de comprendre la nature par leurs expériences.

Grenouille de Galvani - 1786



Aimant d'Oersted - 1819



Pile de Volta - 1800

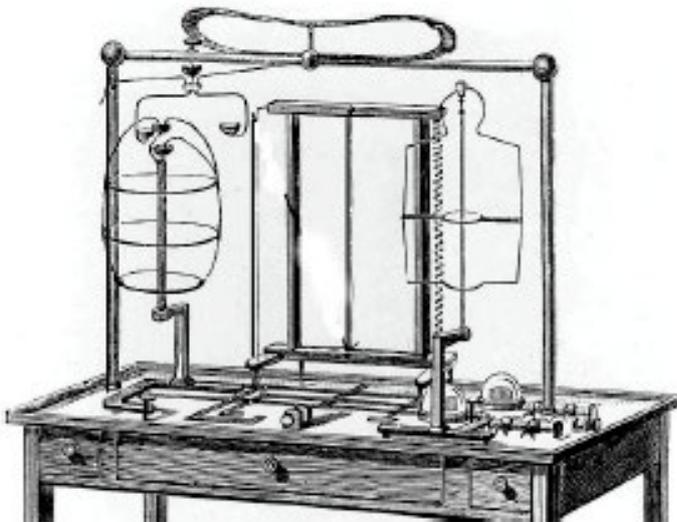
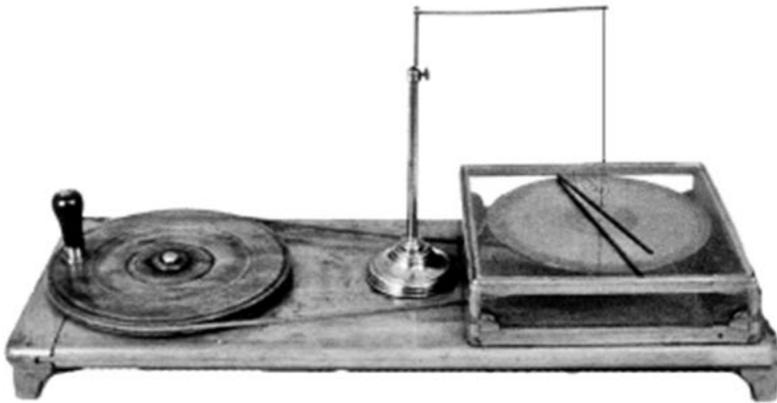


Table d'Ampère - 1820

Ces bricolages ont déclenché au cours du XIX^e siècle une vague déferlante d'inventions, exploitant les étonnantes propriétés de cette invisible électricité, puissant vecteur d'énergie, ou messenger instantané de considérables quantités d'informations.



Disque d'Arago - 1824

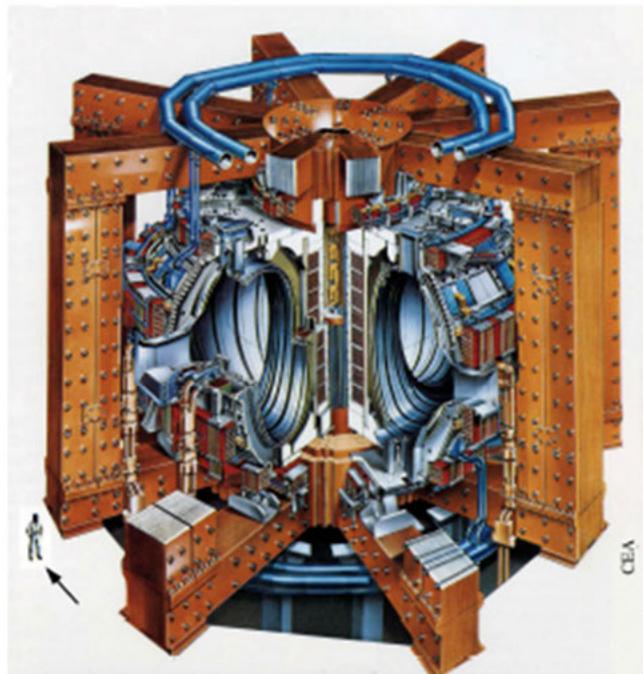
Tore de Faraday - 1831

lignes de force de Faraday



JET Joint European Torus - 1997

Contraste saisissant
avec la taille
et la complexité d'un instru-
ment du XXI^e siècle,
le tore JET,
pour tester la faisabilité
d'un futur
réacteur de fusion
nucléaire,
destiné à produire mieux
et plus
d'énergie électrique



FIN du Tome I

Bibliographie, webographie

Celle relative à un chapitre figure dans les Compléments, en fin de chaque chapitre.
Une bibliographie générale pour l'ensemble du livre figure en fin du tome V

Errata

Ces livres, contenant des milliers d'informations, recueillies dans plus d'une centaine de documents, il en résulte statistiquement quelques erreurs. Le lecteur est donc remercié de signaler les erreurs de fait ou d'interprétation qu'il aura noté, avec leurs sources accessibles, accompagnées de ses remarques et apports personnels à :

contact@electricite-decouvreur-inventeurs.com

Si le lecteur souhaite poursuivre son exploration dans les autres domaines de la genèse du monde électrique, il peut choisir parmi les 4 autres tomes, dont les sommaires sont joints.

Il peut lire auparavant plusieurs extraits de chapitres sur le site web :

ÉLECTRICITÉ – DÉCOUVREURS – INVENTEURS

electricite-decouvreur-inventeurs.com

L'électricité, Découvreurs et Inventeurs

Sommaires

Tomes

I – Défricheurs de l'inconnu

Au lecteur

- 1- L'électricité, essai de définition
- 2- Magnétisme et électricité statique. Des chinois à Coulomb
- 3- L'électricité dynamique, la pile- Galvani, Volta – 1800
- 4- Découverte de l'électromagnétisme - Oersted, Ampère –1820
- 5- Découverte de l'Induction – Arago, Faraday – 1831
- 6- Lois et théories

II – Générer l'électricité

- 1- Générateurs électrochimiques, pile, accu, stockage
- 2- Générateurs statiques thermo/photo/piezo-électriques
- 3- Générateurs électromécaniques à induction
- 4- Bobine d'induction, Page, Ruhmkorff
- 5- Quelles énergies pour produire l'électricité – 1880-2011
- 6- Historique de la production d'électricité en France

III – Et la lumière fut – L'électrochimie

- 1- Lampe à arc
- 2- Lampe à incandescence
- 3- Lampe à décharge
- 4- L'exposition internationale d'électricité à Paris - 1881
- 5- Développements et réseaux d'éclairage électrique
- 6- Electrochimie –Électrométallurgie

IV–Vecteur d'énergie

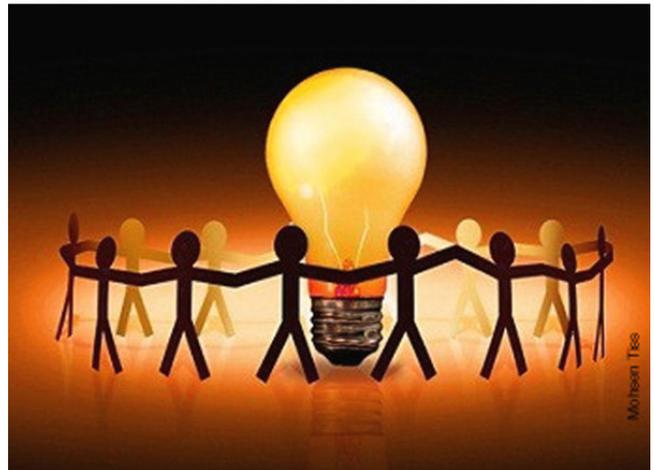
- 1- Moteurs en courant continu
- 2- Transporter *la Force* - Guerre des courants, l'alternatif
- 3- L'alternatif, nouveau vecteur d'énergie, nouvelles machines
- 4- Centrales et réseaux de transport
- 5- Locomotion électrique par terre, mer, air.

V – Vecteur d'information

- 1- Télégraphe
- 2- Téléphone
- 3- Découverte des ondes électromagnétiques – Maxwell – Hertz
- 4- Découverte de l'électron – J.J. Thomson – Tubes à vide – 1897
- 5- TSF – Radiophonie
- 6- Télévision
- 7- Découverte de l'effet transistor, semi-conducteurs –1948



Tome III - Et la lumière fut - Electrochimie



Tome II - Générer l'électricité



Tome V - Vecteur d'information



Tome IV - Vecteur d'énergie

