André Ducluzaux

L'électricité

Découvreurs et Inventeurs

Tome III - Et la lumière fut - Électrochimie

LES ÉDITIONS DU NET

André Ducluzaux

L’électricité

Découvreurs et Inventeurs

Cent aventures de
physiciens, autodidactes,
ingénieurs, techniciens

Tome III

Et la lumière fut

L’électrochimie

LES ÉDITIONS DU NET
22 rue Édouard Nieuport 92150 Suresnes

À Françoise

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

Renvois dans le texte :
(k) = voir figure repère k
(5) = voir complément 5 en fin de chapitre
(II-4) = voir tome II, chapitre 4

© Les Éditions du Net, 2014
ISBN : 978-2-312-03192-7

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 ?

Comprendre le pourquoi et le comment de 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.

Elle 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 classique, limitée à un catalogue chronologique de faits, dates, événements, personnages et machines. Aussi 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 avant leurs causes, après leurs conséquences, pour mieux en percevoir l'originalité et le mystère. Des exemples pour le chercheur d'aujourd'hui, qui y retrouvera ses propres cheminements intellectuels.

– 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 suivi 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 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.

André Ducluzaux 2010

Suite de l'avant-propos, voir tome I

LA LUMIÈRE ÉLECTRIQUE
JOURNAL UNIVERSEL D'ÉLECTRICITÉ
SIGNAUX
51 RUE VIVIENNE
PARIS

Sommaire Tome III

Tome I – Défricheurs de l'inconnu

Tome II – Générer l'électricité

Tome III – Et la lumière fut – L'électrochimie

Fiat Lux **10**

1 – Lampe à arc **13**
Arc électrique – Régulateurs - Éclairage des phares
Bougie Jablochkoff - Arc ou incandescence.

2 – Lampe à incandescence **27**
Précurseurs - Problèmes de conception - Lampe Swan - Lampe Édison
Lampe Maxim - Lampe Lane Fox - Lampe Sawyer - En résumé.

3 – Lampe à décharge **47**
Premières lueurs - Apparition progressive : à vapeur de mercure, au néon,
à vapeur de sodium, tube fluorescent, lampe aux halogénures, fluocompact.

4 – Exposition de Paris 1881 **55**
L'exposition - Salles de la galerie - L'éclairage électrique – Théatrophone
Locomotion électrique - Congrès international des électriciens - Jury des prix et bilan.

5 – Développements de l'éclairage **71**
Campagne publicitaire Edison - Après l'exposition : Edison, Swan, Maxim, Lane Fox
Installations privées - Centrales collectives : Etats-Unis, Allemagne, France, Paris,
Angleterre, Italie, Europe - La force motrice - Vers la lampe moderne.

6 – **Électrochimie, Électrométallurgie** **95**
Lois de Faraday - L'électrochimie à basse température : électrolyse, galvanoplastie
À haute température : électrolyse de l'aluminium, Héroult, Hall.
Électrométallurgie, fours à arc.

Tome IV – Vecteur d'énergie

Tome V – Vecteur d'information

Le sommaire général des 5 tomes figure en fin de livre

Fiat Lux

Depuis l'apparition de l'espèce humaine, chaque soir au coucher du soleil, les hommes sombraient inéluctablement dans l'obscurité totale, atténuée occasionnellement par la lune. La découverte du feu apporta un début de solution, mais que brûler pour obtenir une lumière un peu efficace et durable dans les cavernes et les huttes, plus tard les maisons, châteaux et palais ?

Depuis des millénaires, la solution était restée la lampe à huile, un petit récipient muni d'un bec d'où émergeait une mèche trempant dans l'huile d'origine végétale ou animale, parfois même d'origine minérale, le *massout* qui suintait du sol au Caucase. Puis vint la chandelle de suif malodorante, mais les riches avaient la chandelle de cire d'abeille. En 1825, Chevreul inventait la bougie en stéarine, plus efficace et moins onéreuse.

Deux progrès sont intervenus avant la généralisation de l'éclairage électrique, qui allait changer totalement la vie nocturne de l'humanité :

–la découverte du gaz d'éclairage, après les chinois, par le français Gustave Lebon et l'anglais William Murdoch ; les villes ont alors installé, après 1840, des usines à gaz pour y distiller du charbon, devenant du coke, combustible indispensable pour produire la fonte dans les haut-fourneaux. Le gaz, lui, était distribué aux particuliers par des tuyauteries en fonte enterrées sous les rues, ainsi qu'aux réverbères des rues.

L'arrivée plus tardive du pétrole de Pennsylvanie - le premier baril de pétrole débarquait en 1862 - une curiosité avant que la lampe à pétrole devienne, après 1870, un éclairage amélioré dans les campagnes, ou petites villes sans usine à gaz.

L'éclairage électrique fut la deuxième grande application de l'électricité, après le télégraphe; mais alors que la précédente se satisfaisait de la faible énergie des piles, cet éclairage resta d'un intérêt très limité tant que des génératrices électriques assez puissantes n'étaient pas inventées.

Trois solutions techniques se sont développées en parallèle, mais leur exploitation a été décalée dans le temps :

– la première inventée, *la lampe à arc*, a éclairé les phares à partir de 1860, puis les villes et espaces extérieurs, trop puissante pour les intérieurs. Elle a pratiquement disparu au milieu du XX^{E} siècle.

– La *lampe à incandescence*, la plus universelle, inventée vers 1880,

cède progressivement cette place à la suivante au XXI^{e} siècle.

– la *luminescence par décharge* dans les gaz raréfiés ou fluorescence, découverte mais inexploitée au XIX^{e,} s'est développée au début du XX^{e}, et sera sans doute dominante au siècle suivant, à moins d'être supplantée par la *lampe à diode*.

– il faut aussi mentionner un éclairage indirectement électrique, la *lampe à carbure*, puissante et portative, utilisée là où il n'y avait pas d'électricité. Le carbure de calcium est un corps synthétique issu de l'électrochimie à la très haute température d'un four électrique, à partir de la fin du XIX^{E}. Dans cette lampe, les gouttes d'eau d'un réservoir tombent sur le carbure, l'acétylène qui se dégage brûle avec l'oxygène de l'air, donnant une très belle flamme blanche. Les derniers utilisateurs en sont les spéléologues.

Sur le plan énergétique

Le rapport, énergie /lumière, en watts par bougie - W/b est :

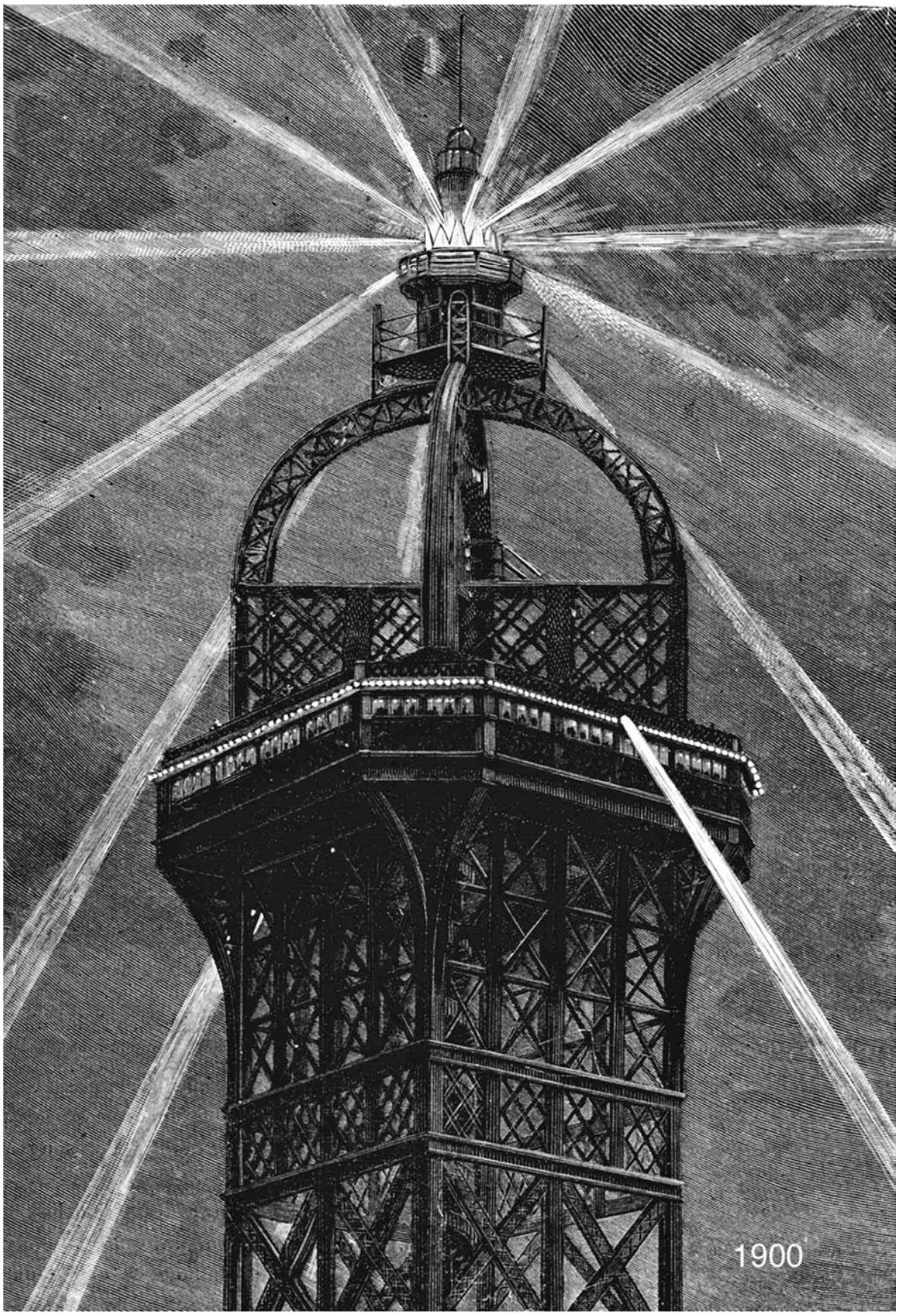
- 86 avec la bougie stéarine,
- 56 avec la lampe à huile
- 43 avec la lampe à pétrole
- 8 avec le bec de gaz Auer
- 3 pour la lampe incandescence au XIX^{e},
- 1 au XX^{e}
- 0,5 pour la lampe à arc dans l'air.
- 0,1 pour la lampe au sodium.

Bougie stéarine 1825

Lampe à huile – 50 000

Lampe à pétrole - 1875

Lampe acétylène 1895



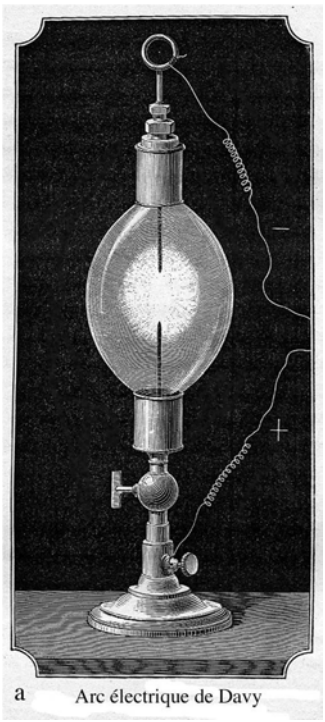
Les projecteurs à arc de la tour Eiffel

1 – Lampe à arc électrique

Dès la découverte du courant de la pile, on remarqua qu'un fil conducteur s'échauffait par le passage du courant, surtout s'il était fin ; il pouvait même devenir rouge, avant de fondre avec une brève et brillante étincelle. L'idée d'utiliser l'électricité comme moyen d'éclairage pour remplacer la lampe à huile fit son chemin.

Humphrey Davy réussit à rendre plus durable cette étincelle en reliant à chaque pôle d'une pile puissante un morceau de charbon de bois ; le contact était d'abord établi entre les deux charbons puis il les éloignait de quelques millimètres faisant ainsi jaillir une lumière éblouissante, un *arc électrique.*

Les charbons se consumaient vite. En chimiste averti, Davy (1) pensa réduire cette combustion due à l'oxygène en les enfermant dans un globe de verre, l'œuf électrique (a), qu'il vidait d'air avec une pompe pneumatique. L'arc s'éteignait moins rapidement, les charbons duraient un peu plus longtemps, sa lumière restait éblouissante, mais pas très longtemps, car le verre du globe se recouvrait de noir.



a Arc électrique de Davy

Il présenta en 1809 l'expérience à la Royal Society, équipée d'une puissante pile à auges de plusieurs centaines d'éléments.

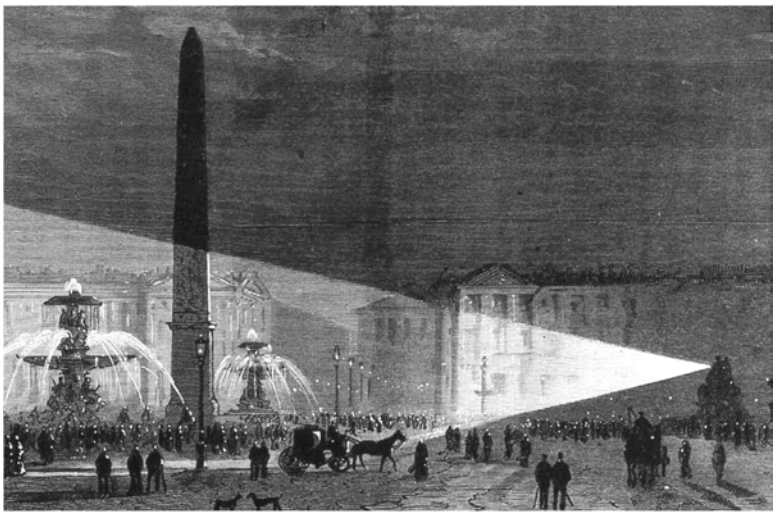
Cette première lumière électrique resta une curiosité présentée aux cours publics de physique ; il n'était pas envisageable d'utiliser un tel phénomène trop éblouissant et peu durable, les piles étant vite épuisées et les charbons brûlés. Mais l'idée était lancée, l'obscurité immémoriale de la nuit pouvait être vaincue par l'électricité.

Ces deux handicaps vont se trouver résolus, d'abord par la mise au point par Bunsen en 1841 d'une pile plus puissante et durable. De plus, l'un des composants de la pile était un morceau d'un charbon dense et bon conducteur, résidu qui se déposait à l'intérieur des cornues de distillation de la houille pour le gaz d'éclairage, récemment découvert. Ce type de *charbon de cornue* s'avéra bien mieux adapté pour entretenir l'arc. Les gaziers ne se rendirent pas compte qu'en valorisant un déchet, ils allaient faire naître un dangereux concurrent.

Léon Foucault, jeune physicien français, qui s'illustra par plusieurs expériences importantes, mettait au point, pour un médecin, des projections d'images visibles au microscope en utilisant la lumière du soleil. Il cherchait à lui substituer la lumière de l'arc de Davy et y parvint avec les piles Bunsen et des tiges de graphite taillées dans ce charbon de cornue.

Avec l'aide de Louis Deleuil, fabricant d'appareils scientifiques, il prépara une démonstration publique de ce genre d'éclairage, un soir de décembre 1844, à Paris sur la place de la Concorde. Le dispositif, comprenant les supports des deux charbons et une optique de concentration de la lumière, était installé sur les genoux de la statue de Lille et une centaine de piles Bunsen dans le socle (b). La foule, prévenue par la presse, était émerveillée par cette puissante lumière qui faisait presque disparaître celle des réverbères à gaz. On pouvait, dit-on, lire son journal au pied de l'obélisque.

L'expérience fut reproduite ailleurs, en particulier en Angleterre, pour faire découvrir au public un aspect étonnant de cette mystérieuse électricité, que seuls encore connaissaient les savants en *philosophie naturelle*, devenant les physiciens.



b Eclairage par arc électrique de la place de la Concorde - 1844

L'arc électrique

Nature de l'arc

Phénomène physique complexe, l'arc dans l'air est un conducteur électrique gazeux, capable de véhiculer des courants très élevés, d'un ampère jusqu'à 100 000A ou plus. Pour qu'un gaz, isolant à la pression normale, conduise l'électricité, il doit être porté à haute température, au moins 3000 °C. À partir d'une telle température, à pression normale, tous les corps passent à l'état gazeux. Dans le vide, l'arc est constitué par la vapeur du matériau des électrodes et se comporte alors presque comme dans un autre gaz à pression normale.

Pour le physicien, l'arc est un plasma, gaz à haute température pouvant atteindre des millions de degrés, soupe d'atomes neutres, d'atomes ionisés positifs par la perte d'un ou plusieurs électrons, lesquels électrons se relaient avec ceux émis par la cathode pour transporter le courant à l'anode. Ce sens est l'inverse du sens conventionnel, adopté arbitrairement un siècle avant de connaître l'électron.

L'essentiel du courant est transporté par les électrons, beaucoup plus légers, près de 2000 fois, que les atomes ionisés qui vont en sens inverse, mais très lentement. On considère que dans un espace donné à l'intérieur de l'arc il y a instantanément autant d'atomes ionisés que d'électrons libres en mouvement, c'est-à-dire que la *charge d'espace* est presque nulle. Cette propriété fait que l'arc peut véhiculer des centaines de milliers d'ampères.

On sait qu'un courant uniquement d'électrons dans le vide est limité à de faibles valeurs, car chaque électron en mouvement repousse le suivant par sa charge d'espace.

Des phénomènes encore mal connus, se produisent aux *racines de l'arc*, court espace d'une fraction de mm où l'arc est en contact avec les conducteurs d'amenée du courant, et les vaporise après liquéfaction. Cette vapeur se mélange à celle du gaz.

Seul le charbon passe directement de la phase solide à la vapeur, propriété avantageuse exploitée dans la lampe à arc.

L'arc n'est pas un nuage de géométrie floue, s'il est libre, il est délimité à une colonne de section circulaire aux contours assez précis. Cette section augmente automatiquement avec l'intensité du courant. C'est aussi un puissant générateur de chaleur à très haute température, propriété qui sera exploitée dans les fours à arc de l'électrométallurgie.

L'arc est un conducteur très sensible au champ magnétique, qui peut se déplacer très rapidement vu sa légèreté. Dans l'air libre, l'arc dégage un peu d'ozone que les hygiénistes considéraient comme bon pour la santé.

Amorçage de l’arc

Un arc se manifeste dans deux circonstances :

- Un claquage disruptif amorçant un arc permanent se produit entre deux pièces conductrices, séparées par un espace d'air à pression normale et portées à une tension dépassant 10 à 30 000 volts par cm, suivant son taux d’humidité et autres facteurs. Si le courant est très faible, moins d'un ampère, l'arc ne peut se maintenir, c'est une étincelle fugitive.

– Deux pièces conductrices étant en contact et traversées par du courant, si on les sépare le courant peut continuer à circuler à travers un arc fugitif ou permanent. Plusieurs facteurs interviennent : la rapidité de cette séparation, la valeur de la tension entre les deux contacts, l’intensité et le type du courant continu ou alternatif, ou encore le matériau des contacts. Tout interrupteur, même celui d’appartement, produit une étincelle, un arc très fugitif, lorsque ses contacts coupent un courant.

Dans le cas de l'arc d'éclairage, l'arc se maintient après éloignement des deux crayons de charbon en contact, avec une tension relativement faible de 40 à 50 V environ. Le charbon, mauvais conducteur de la chaleur, favorise le phénomène de *thermo-émission* : le point de contact restant très chaud juste après la séparation, continue à émettre des électrons, entretenant l'ionisation du gaz qui peut rester conducteur.

Il paraît aussi étonnant que la lampe à arc fonctionne aussi en courant alternatif, qui pourtant s'annule pour changer de sens une centaine de fois par seconde. L'arc s'éteint bien un très bref instant lors du passage à zéro du courant et ne devrait pas se rallumer, les contacts étant éloignés et la tension peu élevée. S’ils sont en charbons, la thermo-émission d’électrons déclenche ce rallumage.

Caractéristiques électriques de l'arc

L'arc se comporte très différemment des conducteurs électriques métalliques, caractérisés par leur résistance. La première étude sur l'arc fut conduite en 1895/96 par l'anglaise Hertha Ayrton, unique femme scientifique du XIX^{e} siècle. L'électron ainsi que la structure de l'atome était encore inconnu. Elle a défini la tension aux bornes de d'arc comme la somme de plusieurs termes :

– une chute de tension fixe aux deux électrodes, de 30 volts environ au total, un peu plus forte à l'anode qu'à la cathode et variable suivant les matériaux de contact

– une chute de tension dans la colonne d'arc, produit de sa longueur par un gradient variable en V/cm, décroissant avec l'intensité, croissant avec le refroidissement de l'arc.

– un autre terme de faible valeur.

Ainsi l’arc est un conducteur qui ne suit pas du tout la loi d’ohm, sa courbe caractéristique est même inverse, c’est-à-dire que si le courant croit, sa chute de tension décroît, l’inverse de tout conducteur résistant. Il est donc instable par nature.

Pour le stabiliser, il faut mettre en série une résistance, qui a l’inconvénient de consommer de l'énergie inutilement. Ainsi, une source d'environ 55 volts est nécessaire en courant continu pour un arc de 15 A, dont 40 V pour l'arc lui-même et 15 V de chute dans une résistance. La bobine de l'électro-aimant du régulateur peut constituer en partie cette résistance.

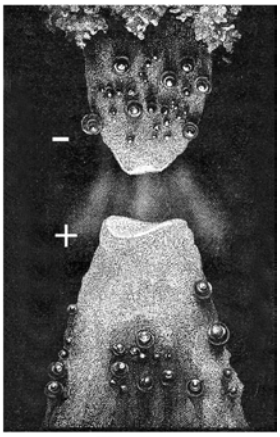
Par contre en courant alternatif il n'y avait plus besoin de résistance, la seule *réactance* (IV-3) de la bobine du régulateur joue ce rôle de stabilisation. Les électriciens de l'époque avaient constaté cet avantage, mais en en ignorant la cause réelle, les particularités du courant alternatif n’étant comprises qu'après 1885-90.

Quelques chiffres :

- L'arc d'éclairage avait une intensité de 5 à 50 A, 100 au plus, avec une valeur courante de 10 A. Il s’éteint à moins d’un ampère.

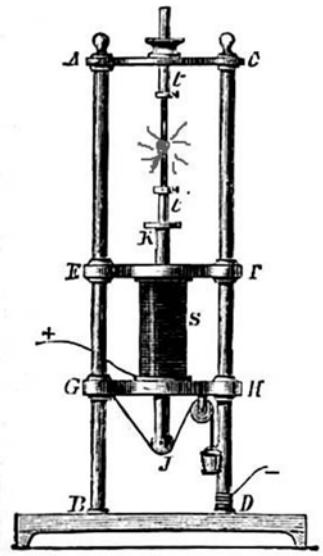
- L'espacement des charbons était de 2,5 mm pour 10 A, 7 mm pour 50 A.

- L'intensité lumineuse atteignait 50 à 500 *becs carcel* suivant l'intensité, donc le modèle. (2)



c Arc électrique

Régulateurs

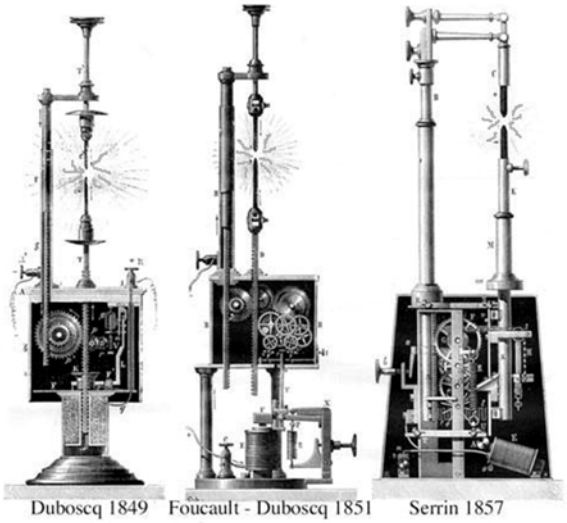


d Régulateur Archereau 1849

Le problème était de mettre en contact les charbons pour allumer l'arc, puis de les éloigner de quelques mm, et ensuite de les rapprocher progressivement car ils s'usaient et risquaient l'extinction au-delà d'une certaine distance . Difficulté accrue par l'usure deux fois plus rapide du charbon positif que du négatif (c).

Les mécaniciens et les horlogers apportèrent des solutions, en concevant différents modèles de *régulateurs* fonctionnant automatiquement plusieurs heures, le temps d'usure des charbons.

On attribue à l'anglais Thomas Wright la réalisation d'un premier régulateur en 1845, suivi de W.E. Staite et C. Petrie. Une démonstration d'éclairage du port de Liverpool était présentée en 1851. En France, Archereau fabriqua un modèle rustique (d) dans lequel un contrepoids pousse le charbon inférieur vers le supérieur, il est équilibré par un électro-aimant traversé par le courant qui tend à réduire cette poussée, plus le courant est élevé.


Duboscq 1849 Foucault - Duboscq 1851 Serrin 1857
e Régulateurs de lampes à arc électrique

Ce principe de l'électro-aimant, ajustant automatiquement l'éloignement des deux charbons en fonction du courant les traversant, sera à la base de presque tous les systèmes que vont développer les inventeurs.

Trois régulateurs, parmi bien d'autres sont présentés en (e) :

On remarque les mécanismes délicats et précis régulant la position des charbons en fonction de ressorts équilibrés par l'électro-aimant. Faut-il préciser que Duboscq était horloger ? Le régulateur Serrin fut l'un des plus appréciés pour sa fiabilité. Après la commercialisation des générateurs Gramme en 1875/1876, ce sont des dizaines de régulateurs qui seront construits.

Malgré l'intérêt de cet éclairage, il ne pouvait guère se développer en raison du coût des piles. E. Becquerel l'estimait en 1857 à au moins 6 fois le prix de l'éclairage au gaz.

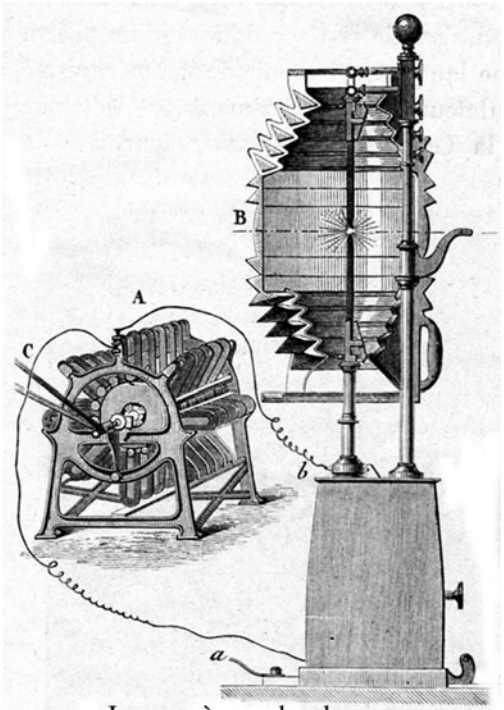
Pour la première exposition de Paris de 1855, avait été édifié le Palais de l'Industrie. Les travaux en retard ont du être accéléré de nuit, en éclairant la grande nef avec des lampes à arc alimentées par des batteries de piles. L'éclairage électrique, puissant, commença par l'éclairage des chantiers de nuit, puis celle des phares

L'éclairage des phares

Jusqu'en 1860 les lampes à arc ne pouvaient être alimentées que par une batterie de piles d'environ 60 volts, ce qui limitait leur utilisation à de rares cas particuliers.

Pourtant, une application importante de l'éclairage par arc allait être le remplacement de la lampe à huile des phares côtiers. Elle succédait au célèbre feu d'Alexandrie, construit par Ptolémée en –285 sur l'île de *Pharos,à* l'entrée d'Alexandrie.. Fresnel avait fortement accru la portée des phares, éclairés à l'huile, par l'invention d'une lentille à échelons, adoptée pour la rénovation de l'ancien phare de Cordouan en 1823. L'enjeu était crucial, suite à l'accroissement du trafic maritime et des naufrages de navires longeant les côtes, cherchant à accoster de nuit dans un port. En 1885 le *British Board of Trade* avait déjà enregistré la perte de nuit d'un total de 2513 navires et 1333 personnes sur ses côtes.

Devant l’insuffisance des piles apparut la nécessité de génératrices plus puissantes que celles de laboratoire, concrétisée simultanément en Angleterre avec la machine d’*Holmes* et en France celle de l'*Alliance* (II-3). Ces dinosaures électriques de plusieurs tonnes étaient entraînés par un moteur à vapeur de trois à quatre chevaux pour alimenter un seul arc électrique d'environ un kW, piloté par un régulateur Serrin (g).



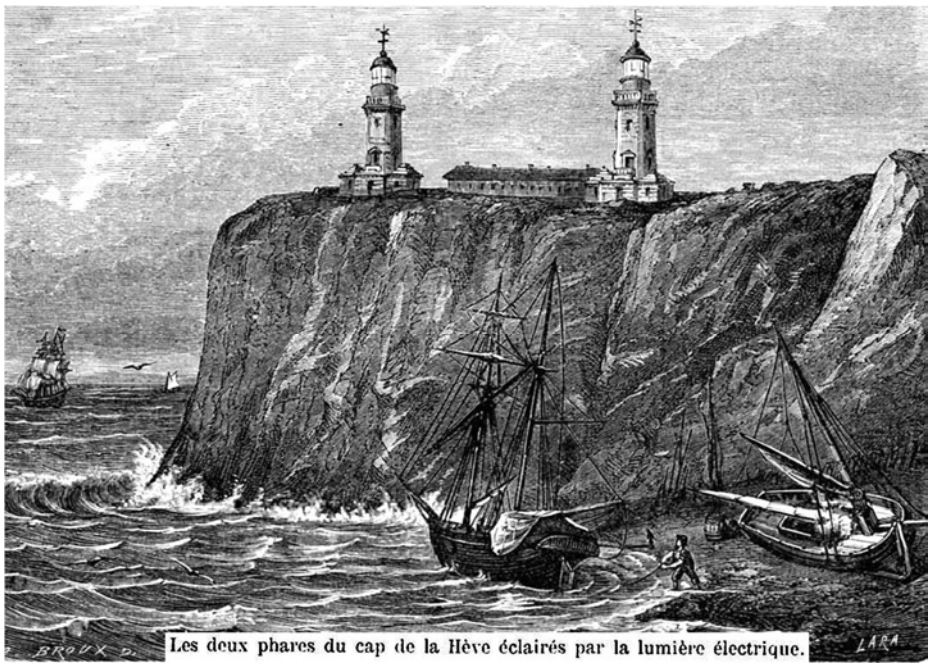
g Lampe à arc de phare

Initialement prévues pour fournir du courant continu ces machines fonctionnaient mal. Une amélioration notable consista à supprimer le collecteur-redresseur de courant et produire alors un courant étrange, *alternativement renversé*, dont il fallut des décennies pour comprendre tous les autres avantages.

De plus, ce courant convenait mieux pour les lampes à arc, les deux baguettes de charbon se consumant à la même vitesse, avantage très appréciable.

En Angleterre, on équipa les phares de South Foreland en 1859, puis Dugeness en 1862. En France, l'évènement fut l'équipement près du Havre de l'un des phares de la Hève en 1863, puis du deuxième en 1866 (h). Ces phares édifiés en 1774 ont été détruits par la guerre en 1944, sans être reconstruits.

En 1880, l'ancien phare du Planier, au large de Marseille, fut surélevé, électrifié et devint le premier phare électrique à éclats, les 45 autres, sur les côtes françaises, restant à feu fixe.

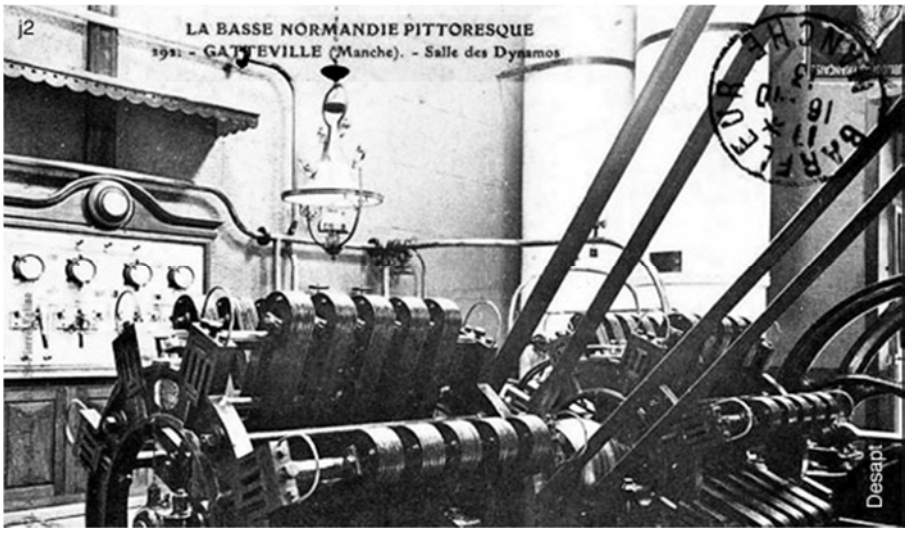


Les deux phares du cap de la Hève éclairés par la lumière électrique.

L'électrification d'un phare n'était pas simple, d'abord il fallait deux régulateurs amovibles, un seul étant en service, l'autre en réserve, pour permettre le changement des charbons toutes les 5 ou 6 heures, et par sécurité en cas de défaillance. Il fallait surtout disposer d'espaces suffisants pour une salle des machines, moteur à vapeur et générateurs d'électricité, ainsi que des réserves de charbon et d'eau.

C'était rarement le cas des phares isolés en mer.

Malgré l'avantage incomparable d'une lumière 600 fois plus puissante que celle des lampes à huile, il n'y avait encore en 1882 que 14 phares électriques dans le monde, dont cinq en Angleterre, quatre en France, deux aux États-Unis. Les machines électriques *Holmes* et *Alliance* du début furent remplacés à partir de 1876 par celle de *Méritens,* puis de *Gramme.* Le phare du Cap Lizard fut équipé du nouvel alternateur *Siemens, en 1878.*



Le phare de Gatteville était encore alimenté en 1893 par deux machines type *Alliance* (j2).

Un problème imprévu se présentait, on retrouvait le matin devant les phares des oiseaux morts, oies, canards sauvages et goélands, attirés par la lumière et venus se fracasser contre les vitres, au risque de les briser. Il fallait les protéger par des grillages, même cela améliorait l'ordinaire des gardiens de phare. Il n'y avait pas d'écologistes pour protester ; mais conseillées par Darwin, ces espèces se sont rapidement adaptées à leur nouvel environnement, ces puissantes lumières surgies dans la nuit.

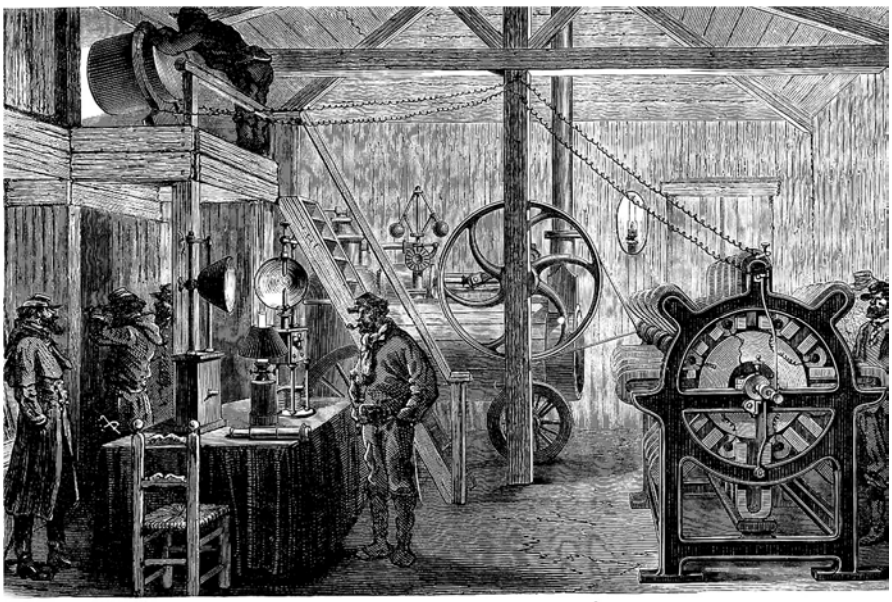
1876, l'électricité-énergie en abondance

Innovation capitale, très attendue, dans l'histoire de l'électricité, l'apparition d'un générateur industriel, puissant et d'un coût acceptable, la machine Gramme, allait être suivi par de nombreux clones. Tout ce que l'on rêvait de faire avec l'électricité, depuis Volta, devenait possible avec une source d'énergie plus puissante que celle des piles.

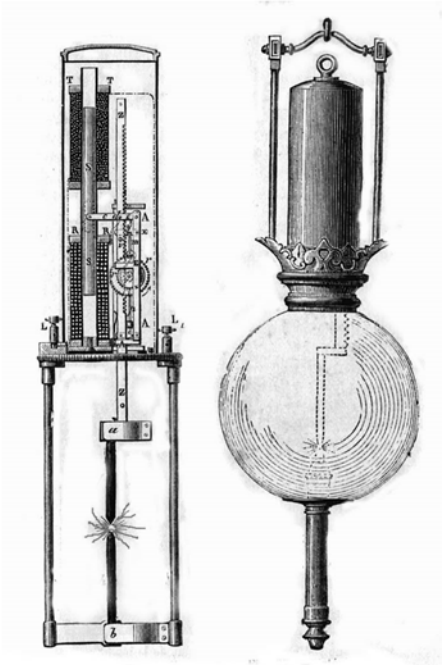
L'exposition de Philadelphie, en 1876, coïncidait avec la vague d'inventions qui allaient surgir en Amérique comme en Europe, particulièrement dans le domaine de l'éclairage électrique.

La lampe à arc était au point, nombre de régulateurs fonctionnaient correctement et la fabrication des charbons avait été améliorée, mais cette lampe restait peu utilisée sauf dans quelques cas particuliers, les phares, les navires et quelques éclairages extérieurs, avec les machines Alliance puis Méritens.

Par exemple, l'éclairage militaire des fortifications à Montmartre pendant le siège de Paris en 1870 (k). Un gros moteur à vapeur entraînait une imposante machine de l'Alliance pour alimenter un projecteur à arc.



k LA LUMIÈRE ÉLECTRIQUE PENDANT LE SIÈGE DE PARIS.



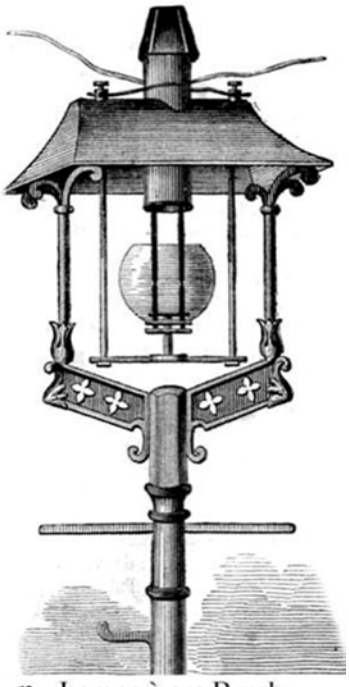
m Lampe différentielle Siemens

Le développement s'accentua, des dizaines de nouveaux constructeurs de régulateurs proposèrent leurs modèles dans tous pays : Crompton, Rapieff, Siemens, Piette, Ganz, Brush, Bürgin, Gulcher, Jaspar, Lontin, Laccasagne et Thiers, Cance, Gaiffe, Hedges, Jurgensen, Mersame, Bréguet, Gramme…Plusieurs livres décrivent leurs principes électriques et mécaniques, très proches pour la plupart. (0). Celui de H. Fontaine, en 1888, décrit 59 modèles de régulateurs, dans divers pays.

L'alimentation électrique des lampes, sous 50 à 60 volts, se normalisa suivant deux schémas :

– **monophote**, les lampes sont alimentées en parallèle, en dérivation sur un circuit sous la tension de 55 V environ. L'électro-aimant du régulateur est contrôlé par le courant traversant la lampe. Le système est souple, les lampes sont allumées indépendamment, mais cette tension trop faible génère trop de pertes en ligne.

– **polyphote**, les lampes sont alimentées en série par deux ou parfois plus, sous une tension plus élevée, 100 à 110 V, ou plus. Le régulateur *différentiel* inventé par Siemens, comporte deux électros, l'un en série, l'autre en dérivation, ce qui facilite la mise en série (m). La tension plus élevée limite les pertes du circuit de distribution, mais les lampes fonctionnent simultanément et un *veilleur* monté en shunt évite la coupure générale du circuit en cas d'extinction d'une lampe.



n Lampe à arc Brush

La normalisation primitive de la tension à 110 V pour l'éclairage, résulta de cette contrainte d'allumer au moins deux lampes à arc de 55 V en série. La lampe à incandescence, apparue plus tard, s'est simplement adaptée à cette tension.

Le rapide essor de la lampe à arc disposant maintenant de génératrices puissantes incita certains industriels à livrer des installations complètes, un système complet d'éclairage. Il comprenait la génératrice avec sa machine à vapeur d'entraînement, les lampes, l'installation des câbles électriques, ainsi qu'une régulation pour adapter la puissance fournie par la dynamo, à celle consommée par les foyers lumineux en service. Cela nous paraît banal, mais très nouveau à l'époque.

En Amérique, la *Brush Electric Company* de Cleveland installait des systèmes d'éclairage public avec des dizaines de lampes en série nécessitant une tension en continu de 800 volts, la plus élevée atteinte à l'époque. La lampe (n) comprenait deux arcs en série avec un système différentiel proche de celui de Siemens. Après le premier éclairage urbain d'Amérique à Cleveland en 1879, nombreuses villes adoptèrent le système Brush. (o) En particulier à New York, Brodway est transformée le 18 décembre 1880 en « Great White Way ».

L'article du *New York Post* remarque : *il y a maintenant six compagnies différentes pour introduire la lumière dans la ville, Brush, Maxim, Jablochkoff, Edison, Sawyer et Fuller.* Pour les trois premières, c'était avec des lampes à arc existantes ; pour les trois autres des lampes à incandescence à venir.

Après l'exposition de Paris de 1881, Brush créa l'*Anglo American Electric Light Company* qui cherchait à installer en Europe des systèmes mixtes avec sa propre lampe à arc et une lampe à incandescence. Il essaya d'abord en 1883 la lampe Lane Fox, puis acheta en 1884 la licence de

l'*United Electric Light Co*, car les financiers d'Edison, avaient compris que son seul système à incandescence pour l'éclairage intérieur devait être complété avec un éclairage à arc puissant pour l'extérieur. L'*United Electric* fut ensuite regroupée dans *Général Electric* en 1892.

o Eclairage des villes américaines avec le système Brush

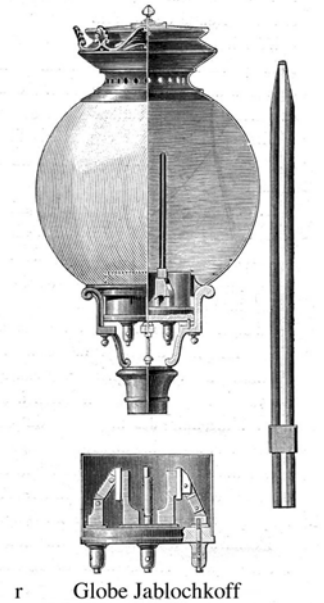
La bougie électrique Jablochkoff

L'année 1876, riche en innovations, le téléphone et le générateur Gramme, vit aussi apparaître la lampe à arc sans régulateur, dénommée *bougie*, de par sa forme. L'inventeur, Paul Jablochkoff, était un Russe, lieutenant à l'Ecole technique militaire. Responsable du télégraphe, il avait été chargé de l'installation d'un projecteur électrique à arc, à l'avant de la locomotive du train impérial lorsqu'il roulait de nuit. On craignait alors un attentat du parti nihiliste contre le tsar Alexandre II (3).

Le jeune lieutenant avait beaucoup de difficulté à maintenir allumée la lampe arc, le régulateur étant perturbé par les vibrations de la locomotive et il cherchait le moyen de se passer de ce régulateur trop délicat.

Il démissionna pour se consacrer à des recherches scientifiques et se proposait d'aller visiter l'exposition de Philadelphie. Passant par Paris, il entra en contact avec Bréguet, travailla dans son atelier et y mit au point une lampe à arc sans régulateur qu'il breveta en mars 1876 (q).

q Bougie Jablochkoff



r Globe Jablochkoff

La bougie était constituée de deux baguettes de charbon parallèles de 25 cm, séparées de quelques mm, espace que l'on comblait avec un isolant minéral capable de fondre ou de se vaporiser au contact de l'arc, le *colombin,* de l'argile kaolin, de la baryte, sulfate de calcium ou de baryum et finalement après nombre d'essais un mélange de plâtre et de baryte. (4)

La matière des charbons fit l'objet de recherches ; ceux de Carré furent adoptés. La lumière, un peu moins puissante qu'avec l'arc ordinaire était plus stable et sa couleur plus agréable.

L'arc était allumé par une amorce à l'extrémité supérieure, du charbon en poudre aggloméré qui se volatilisait quand la bougie était mise sous tension à 45 volts, sans insertion dans le circuit d'une résistance ou réactance de stabilisation comme les lampes à arc.

La longueur égale des deux tiges de charbon imposait que la bougie fonctionne avec du courant alternatif, permettant l'usure égale des deux charbons ; d'où un regain d'intérêt pour ce courant alternatif produit occasionnellement par les machines de l'Alliance. Gramme et Siemens ont alors construit des dynamos alternatives, bien plus simples que les machines traditionnelles pour le continu.

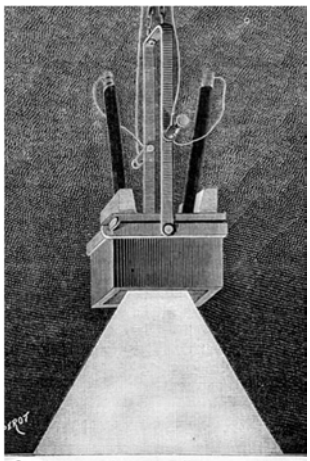
La bougie ne durait au début que deux heures. Aussi Jablochkoff en installa 4 à 6 sur un plateau, l'ensemble étant recouvert d'un globe opalin destiné à atténuer l'éblouissement, quitte à diminuer le rendement (r).

La manœuvre d'un commutateur permettait de mettre en service une nouvelle bougie avant l'usure de la précédente. Un système automatique assura cette fonction dans les modèles suivants.

L'intensité lumineuse était un peu plus faible que pour un arc classique de même intensité ; trois puissances furent commercialisées, la première avec des charbons de 6 mm donnait une lumière de 60 becs carcel et nécessitait 1,5 cheval de force par bougie ; la seconde 45 carcels pour 1 ch et la dernière, mieux adaptée aux ateliers et magasins, 30 carcels pour un demi-cheval. La bougie avait un ronflement assez gênant, déjà rencontré sur l'arc classique, mais plus accentué. Ce qui l'excluait des intérieurs, en plus de sa forte puissance lumineuse

Jablochkoff était un électricien compétent. Pour améliorer la régulation et une meilleure répartition du courant entre les foyers de bougies, il installa des condensateurs en série. Il fit aussi des essais en Angleterre de circuits magnétiques avec deux enroulements de nombre de spires différents, pour nous, un transformateur. Ainsi de nombreuses petites, mais utiles découvertes, élémentaires pour nous, faisaient progresser lentement la construction du système électrique.

Comme pour tout nouveau produit, d'autres inventeurs proposèrent des modèles de bougies un peu différents, Jamin, Wilde et Clerc ; ce dernier proposa une lampe originale, la lampe Soleil plus puissante, mais qui n'eut qu'un succès limité (r2).Sont aussi apparues des lampes mixtes entre l'arc et l'incandescence, tel le système anglais Werdermann, un contact maintenu entre un charbon et un disque en cuivre.



r2 lampe soleil

Il a été signalé (II-3) comment Gramme résolu rapidement, et efficacement à sa manière, l'invention d'une nouvelle « dynamo à courants alternatifs », l'*alternateur* actuel. Sa machine à quatre circuits indépendants alimentant quatre groupes de bougies en série.

Avec un système de commercialisation initié par l'américain Brush et développé plus tard par Edison, la *Société l'Éclairage Electrique* créée en 1877 par Jablochkoff vendait des installations complètes : le générateur Gramme, qu'elle fabriquait en exclusivité, les globes de bougies ainsi que le montage de l'ensemble. De plus elle assurait la vente des bougies, activité lucrative, car plus coûteuses que les charbons des lampes classiques. Après le démarrage en 1877, 420 000 bougies de rechange avaient été livrées en 1878, 980 000 en 1879, consommées par 2500 foyers installés.

La bougie électrique connut un succès rapide. Dès 1877, 16 globes éclairaient les grands magasins du Louvre, de même l'hippodrome de Paris, puis des gares. Une exposition universelle se tenait à Paris en 1878 et la capitale s'illumina à cette occasion. Après une expérience sur la place de l'Opéra, l'avenue entière fut éclairée à 8 h du soir à partir du 31 mai.

s Eclairage de l'avenue de l'Opéra à Paris avec les bougies Jablochkoff - 1878

Les 32 globes de 4 bougies chacun, étaient réparti sur les deux coté de l'avenue, entre les réverbères à gaz, réduits à de pales lumignons. Deux génératrices Gramme étaient installées avec leur moteur à vapeur de chaque coté et les câbles tirés sous les trottoirs.(s)

La Société d'Eclairage avait négocié de payer au début le même prix que le gaz puis 60 centimes par bougie et par heure, à partir du 6 octobre, soit le double du gaz, mais la qualité de l'éclairage était incomparable. Après la grande exposition de 1881, elle n'obtint pas le renouvellement de son contrat et démonta l'installation en 1882. Paris resta ainsi éclairé au gaz jusqu'en 1889, comme toutes les grandes villes, sous la pression des puissants lobbies du gaz, qui bloquaient toute concession dans les Conseils municipaux.

Mais les grands magasins, entrepôts, ateliers installèrent avec profit cet éclairage permettant de travailler après la tombée de la nuit en hiver, avantage inestimable. En 1884, 4500 globes de bougies fonctionnaient tous les jours dans Paris, malgré la nouvelle lampe à incandescence en 1881, 263 aux seuls magasins du Printemps, dont le chiffre d'affaires augmenta.

En 1881, ce fut le grand port du Havre, où abordaient les modernes steamers transatlantiques à vapeur. Ceux-ci ne pouvaient rentrer qu'en pleine mer, à marée haute ; de nuit, ils devaient attendre au large des heures. Les 34 globes nécessaires furent installés sur les quais. Deux machines à vapeur de 35 ch entraînaient quatre dynamos alternatives Gramme à excitation intégrée, plus une de secours, pour alimenter les 3,9 Km de 4 circuits indépendants.

À Rome, un éclairage par l'intérieur du Colisée fut installé. À Londres Jablochkoff réalisa à titre de démonstration ou permanent plusieurs installations : d'abord en décembre 1878, 20 globes le long de la Tamise, sur le quai Victoria entre les ponts de Westminster et de Waterloo (t). La revue *La Nature* rapportait : *la lumière est forte et claire ; toute la voie du quai en est brillamment illuminée et les rayons se projettent bien au-delà de l'autre rive de la Tamise ; quant aux becs de gaz, ils ne servent qu'à faire ressortir la splendide beauté de la rivale …le texte le plus fin des journaux est très lisible à 10 mètres des lampes…* En mai 1879, il installa 30 autres lampes au Waterloo Bridge ; en 1880 une centrale de 75 bougies à Charing Cross.

t Quai de la Tamise éclairé avec les bougies Jablochkoff - 1878

Une concession d'éclairage public fut accordé en 1881 dans trois districts de la Cité, à Brush, Lontin et Siemens. Le système Brush en alternatif haute tension sous 2000 volts s'étendait sur 6 Km avec 32 lampes en série et 24 lampes à la gare de Charing Cross. Lontin eut des difficultés. Siemens installa soit des grands foyers sur poteaux à 15 m de haut, chacun avec sa machine à courant continu, soit 28 petits foyers alimentés par deux machines en alternatif, chacune pour deux sections de 7 foyers en série.

Mais à Londres, comme à Paris dans la rivalité entre l'éclairage au gaz ou à l'électricité, le gaz dominera encore près de 10 ans, pour l'éclairage individuel domestique, même avec la lampe à incandescence.

Dans toutes les grandes villes européennes, le lobby des Compagnies de gaz ne céda qu'en 1889.

Arc ou incandescence ?

Contrairement à ce que l'on pourrait supposer, la lampe à arc ne fut pas concurrencée par l'incandescence à son apparition en 1881 ; ceci malgré ses inconvénients : le régulateur, organe délicat, encombrant et coûteux, surtout le changement des charbons toutes les 4 à 5 heures. La bougie électrique réduisait en partie ces problèmes et se plaçait en concurrente de l'arc à régulateur ; mais en alternatif il y avait un léger ronflement.

La concentration de l'émission lumineuse en un point donnait une belle lumière blanche, mais bien trop éblouissante et puissante pour les usages intérieurs. On pouvait l'atténuer avec des globes de verre blancs opales. Pour tous les éclairages extérieurs, ateliers, halls de gare, la puissance de l'arc était idéale, alors que l'incandescence ne donnera pendant longtemps qu'un éclairage jaunâtre équivalent à nos ampoules de 15 à 25 W.

Le grand problème que l'arc ne pouvait résoudre était cette ***division de la lumière*** de l'arc**,** un éclairage de plus petite puissance. L**'incandescence** l'apporta avec succès.

Sur le plan énergétique, l'arc avait un avantage incontestable, un très bon rendement, rapport de l'intensité lumineuse en lumen, à la puissance électrique. Il atteignait 40 lumens par watt en alternatif, réduit à 25 en continu en raison des pertes dans la résistance, alors que le rendement de l'incandescence était de 2 à 3 lumen/W pour les premières lampes au carbone, devenu 12/15 lum/W pour les lampes actuelles au tungstène.

Donc, les deux systèmes d'éclairage, arc et incandescence étaient plutôt complémentaires, utilisés chacun dans les domaines où leurs qualités propres compensaient leurs défauts ; l'arc pour un éclairage puissant en particulier à l'extérieur, dans les usines, l'incandescence pour les petits espaces intérieurs, maisons, bureaux, ateliers d'artisans.

Pour les éclairages provisoires de chantiers, on installait sur une locomobile les générateurs à côté de la machine à vapeur qui les entraînaient (u)

Après l'exposition de 1881, plusieurs sociétés proposaient des systèmes d'éclairage mixtes avec simultanément des lampes à arc et à incandescence. Par la suite, la lampe à arc ne connu plus de progrès notable et la bougie électrique disparut après 1900.

Par contre l'incandescence ne cessa de progresser au XX^{e} siècle, la lampe à arc n'étant conservée que pour des projecteurs de théâtre de grande puissance, ou pour le cinéma ; elle disparut après WW2.

u Locomobile Siemens pour projecteurs à arc - 1880

Compléments

0 - L'invention de **l'éclairage électrique** a été traitée dans de nombreux livres depuis plus d'un siècle, dans tous les pays, sans compter les multiples articles des revues.

Deux livres de l'époque en français constituent, entre autres, une bonne référence compte tenu de la qualité de leurs auteurs :

TH. DU MONCEL, *L'éclairage électrique*, t.1 et 2, Hachette, Paris, 5 éditions.

HIPPOLYTE FONTAINE, *Eclairage à l'Electricité*, Librairie Polytechnique, Paris, Liège, 3 éditions, 1877 - 1879 - 1888.

Mrs H. AYRTON, *The Electric Arc*, The Electrician, London, 1902.

1 - Davy a été dans le domaine de l'éclairage, avant l'électricité, l'inventeur de la ***lampe de sûreté*** pour l'éclairage des mines de charbon, une découverte d'un impact déterminant, qui sauva des milliers de vies.

En ce début du XIX^e^, la révolution industrielle émergente était basée sur la disponibilité d'une nouvelle et abondante énergie mécanique obtenu par le moteur à vapeur, à partir de la chaleur de combustion du charbon. L'Angleterre, premier pays industriel, bénéficiait d'importantes ressources en charbon, extrait des mines qui se multipliaient.

Mais la plupart dégageaient le terrible gaz **grisou,** *l'hydrogène bicarboné* disait-on, dont les explosions, allumées par les lampes à huile, tuaient des dizaines et même parfois des centaines de mineurs. Il n'y avait aucun autre moyen de s'éclairer sous terre.

La lampe de sûreté est simplement une lampe à huile, enfermée dans un fin grillage refroidissant la flamme, qui ne peut plus allumer le gaz explosif à l'extérieur.

Davy fut comblé de reconnaissances, les propriétaires de mines lui offrirent 1200 livres. Ses amis le pressaient de prendre un brevet qui lui rapporterait au moins 1000 livres par an. *« Non, répondait-il, mon seul but a été de servir la cause de l'humanité, et je suis assez payé par la satisfaction que j'en éprouve…j'ai tout ce qu'il me faut pour mes besoins et mes travaux ; de plus grandes richesses ne pourraient rien ajouter à ma réputation et mon bonheur. Elles me permettraient, à la vérité, d'avoir quatre chevaux au lieu de deux, mais à quoi me servirait d'entendre dire que sir Humphrey Davy attelle quatre chevaux à sa voiture ? »*

Peu probable que l'homme aux mille brevets, Edison, ait tenu aussi ce langage, quand son ami Henry Ford lui donna sa première voiture, roulant avec des chevaux sans crottin.

2 - Unités d'éclairage et photométrie.

Ce fut très désordonné pendant longtemps ; les unités électriques avaient été unifiées à la première conférence de 1881, sauf celles d'éclairage, les divergences entre les multiples constructeurs s'additionnant avec celles entre pays.

L'unité la plus usuelle est celle d'*intensité lumineuse*, :

- Le *carcel* en France, du nom de l'horloger Bertrand Carcel, était l'intensité d'un bec de lampe à huile consommant 42 g d'huile de colza épurée à l'heure avec une mèche bien définie.
- Le *candle* en Angleterre et États-Unis, une bougie brûlant 7,7 g par heure de spermaceti
- La *bougie* de Munich brûlant 10,4 g de stéarine à l'heure
- La *bougie* allemande en paraffine avait 20 mm de diamètre.
- Un bec de gaz, par comparaison, émettait une lumière d'un carcel en consommant environ 125 litres de gaz à l'heure.

La *bougie* décimale, apparue ensuite, valait 0,104 carcel ou 0,88 candle, soit approximativement 1/10.

Aujourd'hui, l'intensité lumineuse s'exprime en ***candela*** (cd), qui a remplacé la *bougie* (décimale)

Comme cette intensité lumineuse est très variable suivant toutes les directions autour de la lampe, une autre unité actuelle, le ***lumen,*** exprime le flux lumineux total diffusé par une lampe dans toutes les directions. Cette grandeur n'était pas prise en compte à l'époque.

Le *rendement lumineux,* actuellement en *lumen par watt,* est une mesure d'efficacité lumineuse en fonction de l'énergie dépensée. Il s'exprimait à l'époque en *carcel* ou *bougie par cheval,* puis par watt. C'était approximatif.

La puissance des arcs allait de 200 à 1000 watts ou plus

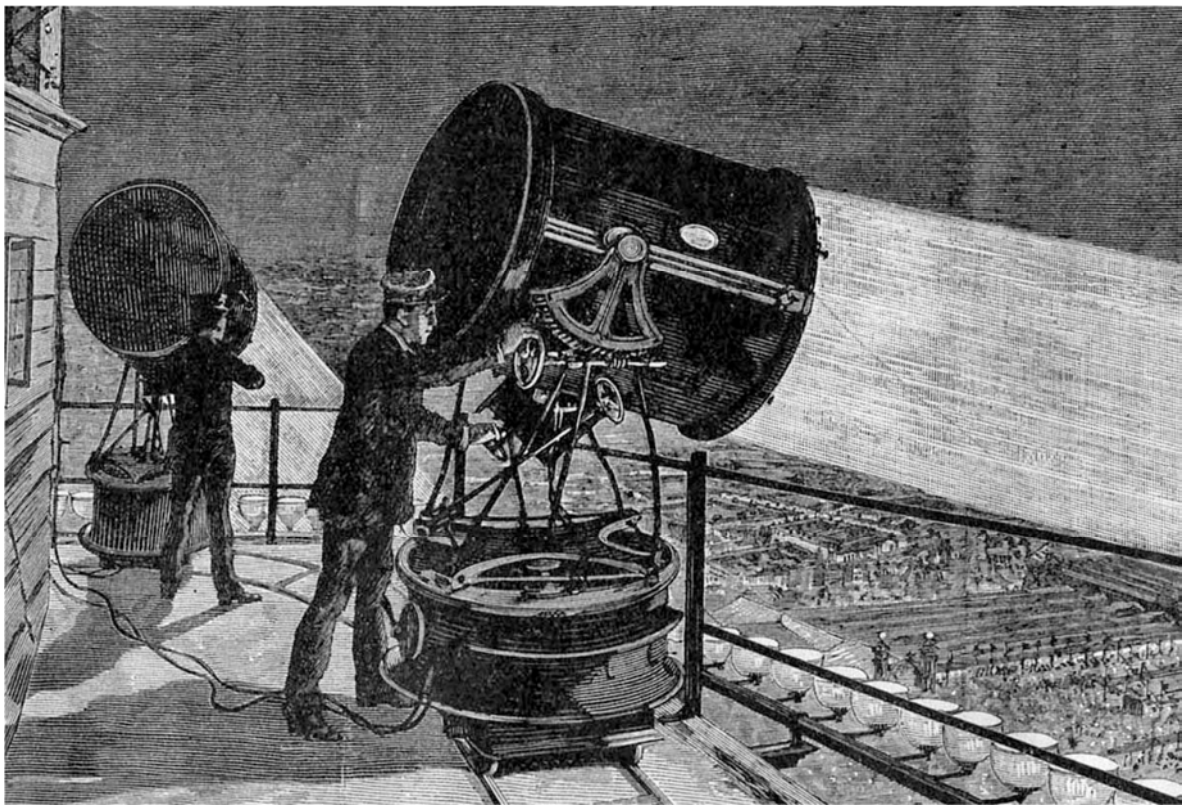
Pour une lumière d'un carcel, il fallait 5 à 7 watts.

Le rendement était ainsi de l'ordre de 120 à 150 carcels par cheval (électrique), ou en unités actuelles 30 à 50 lumens par watt.

3 - Le **tsar Alexandre II** qui a régné de 1855 à 1881 fut un autocrate dit éclairé, réformateur, qui stimula les sciences et techniques nécessaires à la révolution industrielle naissante en Russie. Par ailleurs, il supprima le servage des moujiks, enchaînés à la terre des nobles, propriétaires. Il fut assassiné et ses successeurs revinrent en arrière déclenchant ainsi des révolutions, jusqu'à la définitive, en 1917.

4 - Jablochkoff ne pouvait pas comprendre pourquoi les matériaux à base de calcium, baryum, sodium, potassium favorisaient la stabilité de l'arc. Ils furent classés dans les deux premières colonnes du tableau de Mendeleïev (1869), éléments à très **faible potentiel d'ionisation**. Un électron périphérique de ces atomes est arraché par des chocs de faible énergie, favorisant ainsi la conduction du courant d'arc, simultanément par les ions positifs et les électrons négatifs.

Les ingénieurs d'aujourd'hui, qui cherchent au contraire à éteindre les arcs de commutation dans l'appareillage, évitent d'utiliser ces matières, de même le carbone pour sa propriété de thermo-émission des électrons, même celui contenu dans l'acier.



Projecteurs à arc de la Tour Eiffel en 1900

La lampe électrique 1913
Natalia Gontcharova - Ecole de Chagall

2- Lampe à incandescence

De même que des inventions précédentes, moteurs et lampe à arc, la lampe à incandescence n'est resté longtemps qu'un sujet de recherches de simple curiosité, sachant que son intérêt pratique était presque nul, tant que l'on n'aurait que des piles pour la faire fonctionner.

Son développement a suivi les phases classiques des inventions :

– Les travaux de précurseurs pendant les trois quarts du XIX^{E}.

– La mise au point finale démarrée après 1878, quand l'énergie électrique devenait suffisamment abondante. Ce fut une période mouvementé par la compétition entre plusieurs inventeurs et l'important développement industriel qui devait suivre.

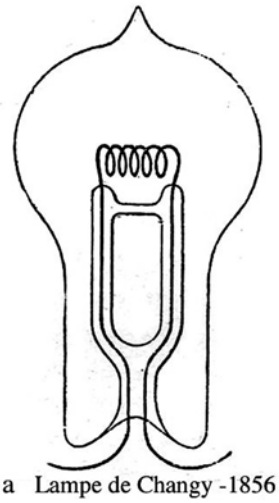
– Les améliorations progressives jusqu'à notre époque, qui ont multiplié ses performances par un facteur d'au moins trois.

– Le remplacement progressif par une autre technologie plus économique, la lampe à décharge.

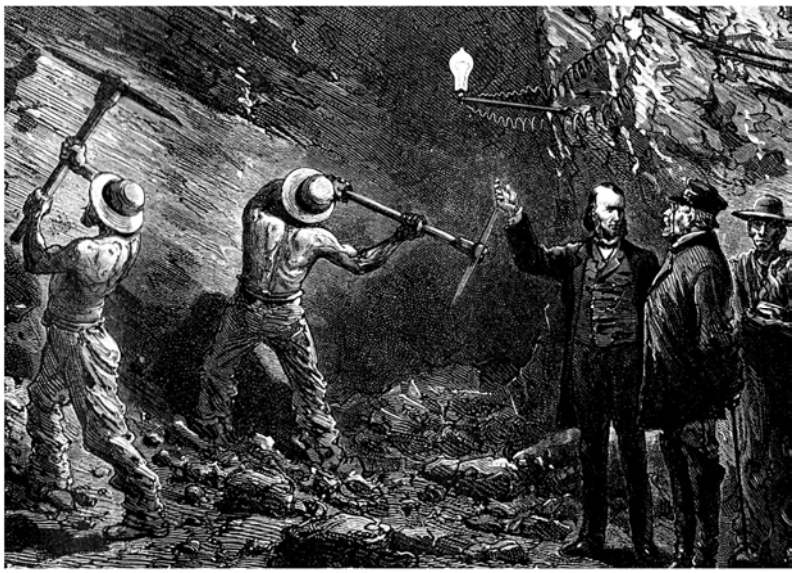
Les précurseurs

On rapporte que Jobard, directeur du musée industriel de Bruxelles suggéra dans *le Courrier belge* de 1838 que l'on obtiendrait une belle lumière en disposant un conducteur de charbon parcouru par du courant dans une enceinte vide d'air. On cite aussi de Moleyns puis l'Anglais Staite qui essaye en 1842 des filaments de platine, puis d'iridium.

J. W. Starr de Cincinnati fait en 1845 une première réalisation avec une lame de platine dans le vide, ensuite remplacée par une tige de charbon de cornue. Il se rend en Angleterre pour présenter un chandelier de 26 lampes, le nombre des États constituants son pays. La démonstration fit sensation et fut approuvée par Faraday, mais il décédait à son retour.



a Lampe de Changy -1856



b Essai de la lampe de Changy dans les mines

L'idée de Jobard fut reprise par son ami C. de Changy, ingénieur des Mines, qui pensait que cet éclairage électrique pouvait apporter une solution au problème du grisou.

Il travailla le problème pendant plusieurs années à partir de 1855, essaya le platine et l'améliora par une carburation (a). Il mit au point un régulateur pour mettre en série plusieurs lampes et les protéger contre une intensité trop forte. De même il essaya des fibres végétales calcinées et réalisa une lampe avec un filament de platine enroulé en spirale autour d'un charbon. Malgré la validité de ses résultats, il ne réussit pas à convaincre les responsables des Mines, suite de l'opposition d'un professeur de l'Académie, Despretz (b).

En 1859, un Américain, Moses G. Farmer éclaire sa maison avec des lampes à filament de platine et en 1875 installe 42 lampes alimentées par une génératrice électrique actionnée par une machine à vapeur, le *télémachon*, fabriqué par William Wallace.

La question est reprise en Russie par A. Lodyguine, en 1873, qui adopte une baguette de charbon amincie au point où elle devient lumineuse. Il a des problèmes avec le vide. Deux autres russes, S. Konn et Bouligine, continuent en 1875 dans la voie des baguettes de charbon de cornue, associée à des systèmes mécaniques compliqués.

Les problèmes de conception

Avec l'expérience acquise par les précurseurs et les connaissances théoriques et pratiques de l'époque, quel chemin restait-il a faire pour arriver à une lampe à incandescence satisfaisante pour assurer cette ***division de la lumière*** ? Objectif prioritaire pour que l'éclairage électrique pénètre dans les maisons, les bureaux, les petits ateliers, là où les lampes à arc compliquées et trop puissantes n'étaient guère utilisables.

Le filament incandescent était la première difficulté.

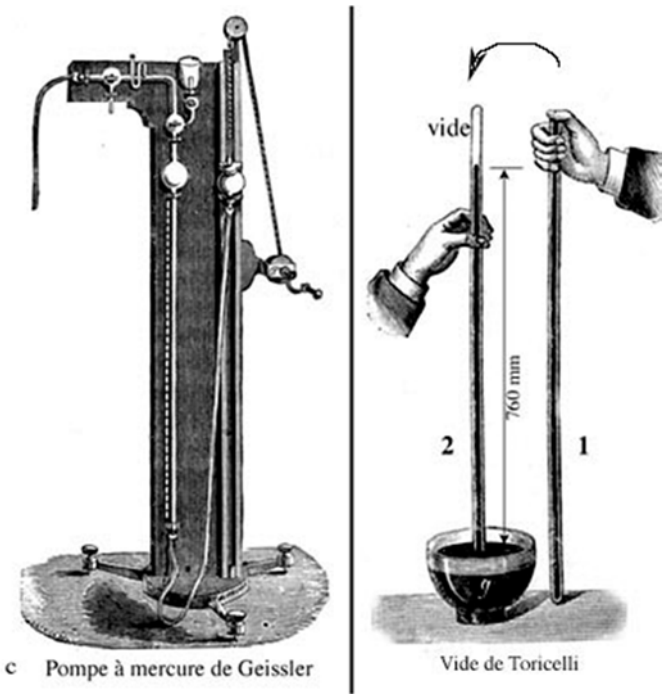
Le platine, seul métal connu à haut point de fusion, près de 2000° C avait une résistivité faible et même avec une section minimale et une grande longueur, enroulée en spirale, il ne permettait que des lampes sous une ou deux dizaines de volts, qu'il faudrait mettre en série pour arriver vers 100 volts, tension minimum d'alimentation souhaitable pour une distance d'une à deux centaines de mètres du générateur.

Un autre métal, l'iridium était plus résistant, fondant à 2740° C mais très rare.

Le seul matériau envisageable était le carbone, plus de 200 fois la résistance du platine suivant ses différentes formes, infusible, permettant de hautes températures, 1700 à 1800° C. Restait surtout à l'obtenir en filaments assez fins et courts, avec une bonne résistance tant mécanique qu'électrique pour être alimenté vers 100 volts. La difficulté pour les expérimentateurs était de choisir entre de multiples possibilités, celle qui paraissait comme satisfaisant l'ensemble des contraintes techniques, pratiques et économiques pour une fabrication industrielle.

Le soufflage du verre était une pratique courante, mais la soudure de conducteurs métalliques dans le verre, sauf celle du platine, pouvait dégrader l'étanchéité avec leur dilatation par échauffement, différente de celle du verre.

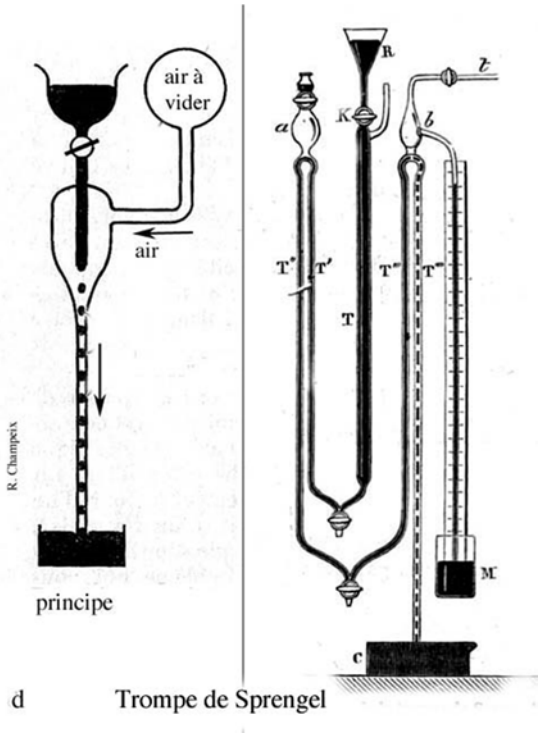
Un vide profond était impératif pour éviter la combustion des filaments, mais l'ancienne pompe mécanique à pistons, dite pneumatique, ne faisait qu'un vide très imparfait d'un torr (ou mm de mercure).



c Pompe à mercure de Geissler

Vide de Toricelli

Heinrich Geissler conçut en 1855 un système analogue au baromètre de Torricelli (c), renverser dans une cuve de mercure un tube plein, le poids de la colonne équivalent à 760 m de mercure



d Trompe de Sprengel

Dans le haut du tube le vide était presque parfait. Son système consistait donc à abaisser et relever plusieurs fois un récipient plein de mercure relié au vase à vider d'air. Le vide obtenu atteint 1/100 à 1/1000 de torr.

Hermann Sprengel, d'origine allemande, inventa en Angleterre, vers 1865, une pompe plus perfectionnée, utilisant aussi le mercure, basé sur le principe des trompes à eau fonctionnant comme soufflerie pour les haut-fourneaux de sidérurgie. Des gouttes de mercure tombant dans un tube fin entraînent l'air d'un bocal fermé qui se vide ainsi. (d).

Crookes utilisa ces deux systèmes, combinés par Alvergniat, pour étudier les décharges dans les gaz raréfiés, inventer le radiomètre en 1875, puis découvrir les rayons cathodiques. Ces travaux de Crookes qui étonnaient le monde des physiciens révélèrent aux inventeurs de lampes à incandescence que le vide profond était possible, à leur portée.

Le vide n'était donc plus le problème majeur, mais allait poser une autre difficulté, lorsqu'on y chauffe un conducteur, il libère des gaz occlus qui *casse*nt ce vide. Ce phénomène inconnu fut difficile à com-prendre, et la solution était mais pas évidente, chauffer le filament pendant la mise sous vide.

Ces problèmes, **quatre *développeurs,* Swan, Edison, Maxim et Lane Fox** les résolurent en deux à trois ans pour présenter ensemble leurs lampes en août 1881 à la grande exposition de Paris. La qualité de ces lampes était très proche, comme leur technologie.

Deux autres américains, Sawyer et Farmer avaient aussi étudié une lampe à la même époque, mais ne la présentèrent pas à l'exposition.

Le terme de développeur est préféré dans ce cas à celui de co-inventeur, quand une dizaine de personnes ont déjà déblayé les difficultés et apporté aux suivants les leçons de leur échec. De même quand quatre expérimentateurs arrivent à un résultat très proche, presque simultanément, à moins d'un an d'intervalle, lequel serait l'inventeur unique ? Celui qui a su prendre le bon brevet, plus tôt que les autres ? L'exemple de la lampe à incandescence illustre bien la vanité de rechercher quel est l'inventeur de chaque invention. Et puis, si Geissler et Sprengel n'avaient pas inventé leurs pompes à vide, clef incontournable du succès, aucun des quatre n'aurait mieux réussi que leurs précurseurs. (1)

La lampe Swan

Joseph Wilson Swan était un jeune inventeur écossais, qui avait travaillé dans le domaine de la photographie naissante, en inventant le *carbon process,* ou procédé *Autotype* puis le papier de tirage au bromure d'argent, qui a permis de tirer sur papier des millions de photos noir et blanc.

C'est à une conférence de Staite à Sunderland en 1845 que Swan fut sensibilisé à la question de la lampe électrique et eu connaissance du brevet que Starr avait pris sur le sujet. Il comprit alors que la solution n'était pas un filament en platine mais en carbone. Il fit quelques recherches en 1848 en carbonisant différents papiers et cartons. Après des années, il reprit ces travaux en 1855 pour obtenir des filaments assez fins et souples pour être recourbés en fer à cheval à partir de papier *parcheminé,* traité à l'acide sulfurique. La durée de vie de ces lampes était de moins d'une heure. Le vide obtenu avec la pompe classique était très insuffisant.

Par ailleurs, il se rendit compte que la nécessité d'avoir une batterie de piles pour alimenter ses lampes leur retirait l'essentiel de leur intérêt. Il abandonna alors ses travaux.

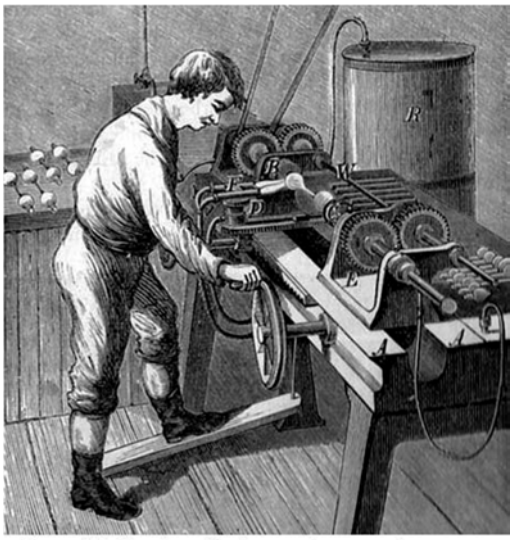
Les deux verrous qui avaient arrêté Swan s'éliminèrent dans les années suivantes : d'une part Sprengel inventait sa pompe à vide, complétant celle de Geissler, et Alvergniat combina des deux systèmes ; d'autre part 1876 fut cette année faste pour l'électricité, où furent commercialisées les premières génératrices puissantes, attendues depuis 40 ans. Swan reprit alors en 1877 ses travaux sur la lampe.

Le problème du vide apparut comme résolu quand les expériences spectaculaires du radiomètre de Crookes en 1872 et 1875 furent connues et son mémoire édité en 1876. Par chance, Swan entre en contact avec Charles Henry Stearn, un amateur passionné par l'obtention du haut vide obtenu par Crookes ; il s'associe à lui et en juin 1877 et déposent ensemble un brevet d'améliorations à la pompe de Sprengel et reprennent des essais avec des filaments de papier carbonisé.

L'invention

Il se rend à Paris pour l'exposition de 1878 et en revient étonné par les nombreux éclairages par lampe à arc, l'avenue de l'Opéra, le magasin du Louvre, le théâtre de la Gaieté. Cela renforce sa résolution de persévérer vers cette *division de la lumière* qu'apporterait une lampe à incandescence moins éblouissante. Il prend conseil pour le filament auprès de C.F. Cross, spécialiste qui inventera le fil du premier textile artificiel, la *viscose* en 1892.

Il associe à son projet un souffleur de verre Fred Topham (d2). Des difficultés se présentent pour le raccordement du filament de carbone avec les fils d'amenée du courant en platine, scellés dans le verre.



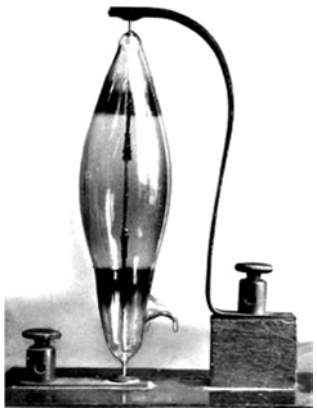
d2 Machine à souffler le verre des ampoules

En octobre 1878, une annonce étonnante est diffusée par les journaux, venant du déjà célèbre Edison :

« I have just solved the problem of the subdivision on the électric light indefinitely ».

La nouvelle est accueillie en Europe avec beaucoup de scepticisme, compte tenu du comportement déplaisant du personnage lors de sa pseudo-invention du microphone à charbon (V-2). On attendait de voir. Le terme surprenant de *indefinitely* signifiait peut-être que le système ne nécessitait pas que l'on change les filaments en charbons toutes les cinq heures comme ceux des lampes à arc

Cela stimula probablement Swan qui décida de présenter en public une lampe en fonctionnement. Mais ses travaux sur les filaments en carton carbonisé n'étant pas encore concluants, il construisit une lampe rudimentaire dont le filament était un petit bâtonnet de carbone rigide taillé dans un matériau que le français Carré avait mis au point pour les lampes à arc.



e Première lampe Swan 1878

Le 19 décembre 1878, il présenta cette première lampe en fonctionnement au meeting de la *Newcastle Chemical Society* (e) devant une trentaine de personnes.

D'autres présentations avec conférences ont suivi début 1879, à Sunderland puis à Gateshead devant 500 personnes.

La démonstration du fonctionnement de ce prototype n'était qu'un succès relatif, car la paroi interne se noircissait assez rapidement. Swan se heurtait à un problème inconnu qui se révélera difficile à comprendre et à solutionner. Il confia la lampe pour analyse à un membre de la Society, Proctor, dont le rapport apportait des éléments sur lesquels il travailla. Le dépôt de carbone sur le verre ne venait pas comme on pouvait le penser de la volatilisation du filament, mais d'un transport mécanique par les gaz occlus dans celui-ci et s'en échappant avec la forte chaleur,

cela réduisait le vide. On constatait que plus le vide était profond, moins ce dépôt était rapide ; de même, il diminuait en chauffant le filament par une flamme extérieure pendant la mise sous vide progressive.

La solution mise en œuvre début 1879 sera de chauffer le filament par un courant pendant le fonctionnement de la pompe à vide. Ce point capital ne sera breveté qu'en janvier 1880. En fait, ce noircissement aurait été moins rapide s'il avait utilisé du papier carbonisé plutôt que le charbon de cornue.

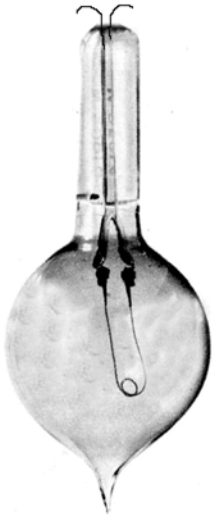
L'année 1879 sera alors consacrée à deux autres problèmes.

D'abord trouver un filament autre que ceux utilisés au début, obtenus à partir de papier ou carton *bristol* carbonisés. Plutôt que d'essayer au hasard des dizaines de matériaux, Swan cherche une matière végétale à fibres longues, capable de conserver cet état après carbonisation. Le coton convient, d'abord à partir de simples fils à coudre, mais mieux sous forme tressée comme celui constituant les mèches de lampes. Il le traite par l'acide sulfurique dilué, ce qui le transforme en fils transparents homogènes et bien ronds qui donnent après carbonisation des filaments souples et résistants qui peuvent prendre la forme de spirales ou en arche de fer à cheval. Ce matériau, le *parchmentised thread*, s'avèrera le matériau définitif adopté ensuite par presque tous les suiveurs.

Une autre difficulté était la liaison électrique entre ce filament et les connexions de sortie en platine ; elle sera résolue avec l'aide de Charles H. Gimingham

En janvier 1880 l'incendie de son laboratoire détruisit un important matériel et retarda ses travaux. Depuis 1879, Stearn, l'associé de Swan lui conseillait fortement de breveter sa lampe, mais il considérait qu'une lampe à incandescence contenant un conducteur en carbone dans un globe de verre vide d'air n'est pas brevetable, ayant été réalisé depuis longtemps.

Ce fut une grave erreur stratégique, le 10 novembre 1879 Edison déposait le brevet anglais n° 4576 d'une telle lampe qu'il vient à peine de réaliser, ayant breveté jusque-là des filaments de platine. Swan ne déposera qu'en 1880 quatre brevets couvrant les détails importants de sa fabrication : pomper l'air en chauffant le filament, le filament lui-même en tresse de coton carbonisé et ses attaches aux conducteurs de sortie.



f Lampe Swan 1880

Développement

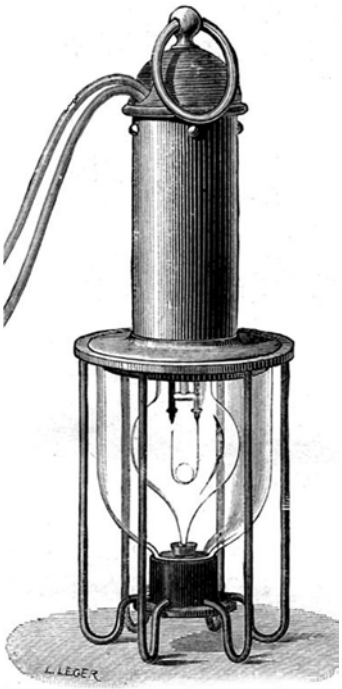
À partir de l'été 1880, la lampe est maintenant au point (f), Swan organisa alors une conférence à la *Newcastle Literary and Philosophical Society* le 20 octobre 1880. À la fin, sur son signal les 60 becs de gaz éclairant la pièce sont éteints, c'est l'obscurité et soudain 20 lampes électriques sont allumées, bien plus brillantes que le gaz. D'après un participant, M. Shollbred, deux types de lampes étaient présentées, de 25 et 50 candles. L'intensité était de 0,8 weber, fournie par une machine Gramme type A capable d'alimenter 30 lampes. Une estimation approximative de la puissance lumineuse des trois éclairages présentés donnait : gaz 1, lampe Swan 3, lampe à arc Crompton 6.

C'est la première fois en Europe qu'un bâtiment public est éclairé par des lampes électriques à incandescence. La démonstration est renouvelée le 24 novembre à la *Society Telegraph Engineers.* C'est l'enthousiasme du public comme des spécialistes. Il faut alors s'engager dans la fabrication.

La *Swan Electric Lamp Company, Ltd* est créée à Newcastle avec un capital de £100,000, et R. E. B. Crompton comme ingénieur en chef. Celui-ci était l'un des principaux constructeurs anglais de lampes à arc et de machines. Une usine est installée à Benwell, les filaments élaborés à Birkenhead sous la direction de Stearn, des souffleurs de verre allemands, importés de Thuringe sont formés par Fred Topham, une équipe de femmes aux doigts agiles est formée pour le montage des filaments. Edmunds, pionnier de l'industrie électrique apporte sa compétence industrielle pour l'organisation, Gimingham prend en charge l'adaptation des accessoires et le frère Alfred Swan conçoit la douille support.

En décembre 1880 est réalisée chez Sir William Amstrong à Rothbury la première installation d'éclairage hydroélectrique ; la force de l'eau est transformée en lumière par une machine Siemens entraînée par une turbine de 6 HP (2).

D'autres installations suivent, en particulier chez le célèbre Sir William Thomson.



h Lampe de mineurs Swan

Début 1881 commence la commercialisation. De nombreuses installations privées et publiques sont réalisées. L'éclairage par incandescence va être aussi apprécié dans la marine et les mines.

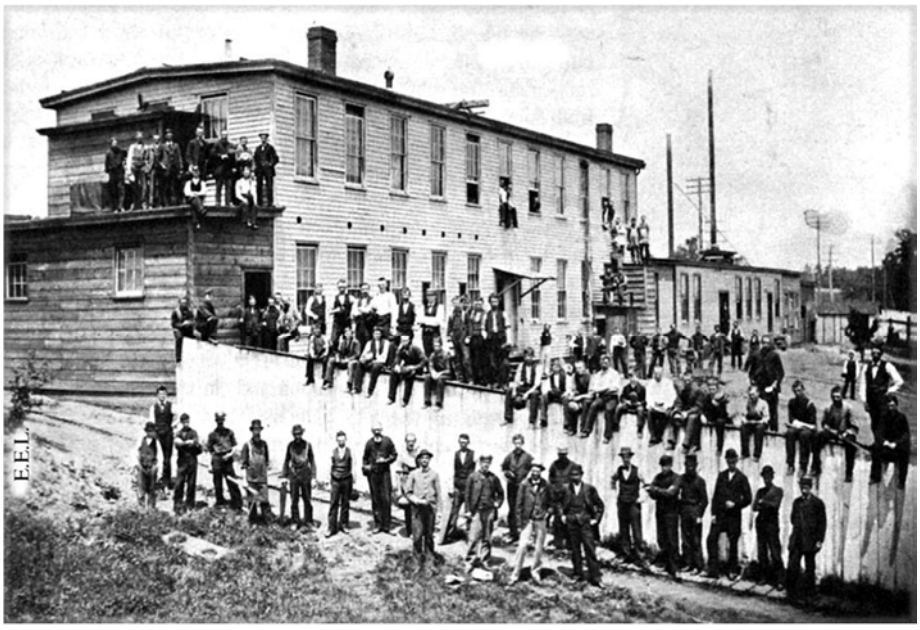
Les navires à vapeur commençaient à s'équiper de projecteurs à arc pour la navigation de nuit près des côtes, l'incandescence allait apporter du confort pour l'éclairage intérieur. En juin arrive à New York le premier transatlantique *City of Richmond* éclairé avec 60 lampes. La Royal Navy l'adoptera ensuite sur le HMS *Inflexible.*

Pour les mines, Swan reprend le projet de Changy, interrompu en 1856, donner aux mineurs une lampe de sécurité électrique qui ne produise pas d'étincelle susceptible d'allumer le grisou (h). Elle est équipée d'un accumulateur Planté modifié permettant un éclairage de deux candle pendant 10 heures et d'un détecteur de grisou, *fire damp,* une spire de platine traversée par le courant qui s'illumine en cas de danger.

À l'exposition internationale de Paris, pendant l'été 1881, la lampe Swan sera l'une des quatre présentée au public, non comme un prototype, mais comme un produit industriel fiable et commercialisé déjà à des centaines d'exemplaires.

La lampe Edison

Le jeune Thomas Edison s'était révélé en 1877 par l'invention d'un microphone à charbon, permettant à la puissante Western Union de concurrencer la Bell Telephon. D'autres petites inventions, telle la plume électrique, étaient longuement commentées par la presse, s'ajoutant à la rumeur. C'est l'invention du phonographe, la *talking machine* qui enthousiasma surtout le public. Le *Daily Graphic* d'avril 1878 soulignait : « *Edison Invents a Machine that Will Feed the Human Race* » (3). Il présenta sa machine à Washington au Président, au Congrès et à l'Académie des Sciences. Il était devenu un véritable magicien, le *Wizard of Menlo Park* (4). C'était dans ce petit village de Pennsylvanie, à une heure de New York par le chemin de fer, qu'il avait installé non pas un simple laboratoire avec quelques assistants, mais une *invention factory*, qui devint mythique pour la jeune Amérique. (j)



j Menlo Park - 1880

Ce centre de recherches ou plutôt de développements, une innovation à l'époque, était financé à la fois par le revenu de ses brevets sur la télégraphie et une contribution hebdomadaire de 100 $ allouée par

la Western Union pour avoir le droit d'acheter en priorité les inventions, à un prix fixé par arbitre. Un employé de Menlo-Park gagnait 4 à 5 $ par semaine ; leur nombre, très variable en fonction de la charge de travail, était d'une quinzaine en août 1878. Pour le projet d'éclairage électrique qui allait démarrer ce nombre sera porté à 35 en 1879, puis 60 en 1880 avec un *turn over* assez important de 200 personnes en deux ans. Edison était un patron très exigeant. Le staff d'encadrement d'une dizaine de personnes avait des compétences et fonctions diversifiées : Charles Batchelor, anglais arrivé en Amérique à 22 ans, était le fidèle et solide bras droit d'Edison - John Kruesi, un ancien aussi, était le chef mécanicien - Francis R. Upton embauché fin 78 était un jeune physicien compétent en électricité et chimie.

Le projet d'inventer une lampe incandescence, pour la *division de la lumière,* était envisagé par d'autres depuis 1876., la lampe à arc étant trop puissante pour les intérieurs. Edison s'y lança à la suite d'un voyage dans l'Ouest effectué avec des scientifiques, pour y observer dans les *Rockies* une éclipse totale de soleil le 23 juillet.

Ce voyage de plusieurs semaines était organisé par Henry Draper, le professeur G. Barker avait proposé à Edison d'y participer pour essayer l'une de ses inventions récentes, un *tasimeter,* appareil au carbone comprimé, très sensible pour mesurer la température.

Au cours des longues journées en chemin de fer, Barker l'encouragea à s'intéresser au problème de la lumière électrique et d'aller voir William Wallace qui était encore le seul Américain à avoir construit avec Moses Farmer une dynamo-électrique en 1875.

Dès son retour, Barker l'accompagna chez Wallace à la fonderie de cuivre qu'il dirigeait à Ansonia. Edison est alors impressionné par ce groupe d'un moteur à vapeur entraînant une machine électrique, dénommé *télémachon,* alimentant huit régulateurs d'arcs électriques éblouissants, mais inutilisables dans une maison. Comme l'écrivait le reporter du *New York Sun* qui relatait cette visite *: the subdivision of electric lights was still a thing unknown to science.*

La presse était en effet un partenaire indispensable aux réussites d'Edison, la communication un outil essentiel qu'il exploitait avec la même méthode que ses appareils de laboratoire, car susciter l'enthousiasme du public était indispensable à l'obtention de capitaux importants des grands financiers et investisseurs, lesquels attendaient en retour des résultats. Les journalistes étaient à l'affût des événements et déclarations du sorcier de Menlo Park et les amplifiaient, créant un véritable mythe autour du personnage.

Edison, dont les activités en début 1878 étaient plutôt réduites, son phonographe, simple curiosité se vendait mal, décide donc d'attaquer immédiatement ce problème de la *division de la lumière,* c'est-à-dire d'une lampe à incandescence, mais la lampe n'est qu'un objectif intermédiaire, son grand projet c'est de remplacer l'éclairage au gaz par l'électrique. Il avait constaté que dans le domaine de la télégraphie comme du téléphone, la puissante Western Union gagnait de l'argent surtout avec un service rendu permanent, les communications, plus que par la vente du matériel.

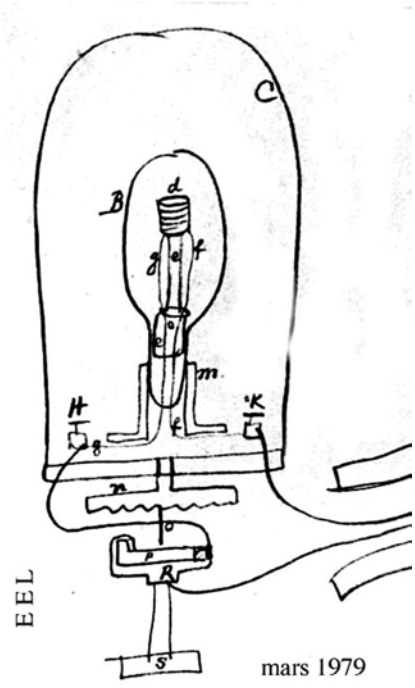
Il fabriquera donc les générateurs électriques, installera des conduites souterraines pour distribuer l'électricité à domicile en ne vendant que les lampes et accessoires, mais principalement l'électricité consommée.

Un projet aussi ambitieux nécessitait d'importants capitaux, à investir d'abord dans les recherches de Menlo Park. Edison a su gagner la confiance des financiers qui appréciaient cet homme travailleur et déterminé qui leur avait fait gagner de l'argent avec le télégraphe. À l'annonce d'une nouvelle invention en préparation, des contacts sont pris avec les dirigeants de la Western, P. Lowrey, un ami, puis Anderbildt,.

Ce dernier avait déjà des participations importantes dans le télégraphe et les sociétés gazières. L*'Edison Electric Light Company* est créé avec un capital de $ 300,000, une avance de $ 50,000 est accordée à Edison pour les recherches et une royalty de $ 30,000 annuelle, s'il est prouvé que c'est plus économique que le gaz, ce dont il s'affirmait certain.

Les investisseurs s'informent périodiquement de l'avancement des recherches ; même quand des difficultés sérieuses se présentent, Edison, homme de communication, sait conditionner l'information, à destination des financiers ou des journalistes.

Comme tous ses prédécesseurs, dont au début il semble ignorer les travaux, il démarre en septembre 1878, en chauffant par le courant des piles une spirale de platine, mais avec deux particularités, le fil incandescent à l'air libre n'est pas enfermé dans le vide et curieusement le courant doit être contrôlé automatiquement par un régulateur pour éviter la fusion du fil. Ses premiers *caveat* de l'automne, dépôts prévisionnels de brevet, décrivent ainsi de multiples systèmes de régulateurs thermiques et électromécaniques (k)



k Lampe à régulateur pneumatique

Le choix du platine, le métal au plus haut point de fusion est classique, mais le laisser à l'air libre compte tenu de son absence d'oxydation est hasardeux ; quant à la nécessité d'un régulateur, elle est surprenante. Peut-être Edison a-t-il cherché à transposer à sa lampe le régulateur de la lampe à arc qu'il a vu chez Wallace, mais qui a d'autres fonctions, dont celle de stabilisation de l'arc. Ce régulateur était inutile, aucun des autres chercheurs de lampes n'en avaient vu l'intérêt, mais comme l'avenir le révélera, les connaissances d'Edison en électricité étaient sommaires, c'était surtout un mécanicien habile.

Après un travail important et des centaines d'essais, il abandonnera ces trois options de départ ; début 1879 il envisagera de placer le filament dans le vide, dans un *« light bulb »*, six mois plus tard il abandonnera les régulateurs inutiles, et finalement adoptera en octobre le filament de carbone, solution adoptée par ses prédécesseurs, à la place du platine.

Il est difficile de savoir si ce faux départ, qui a occasionné un an de retard sur la lampe et un coût appréciable, résulte de la méthode de travail ou d'un autre dysfonctionnement de *l'usine à invention*, qui avait pourtant déjà donné des résultats. Sur la méthode édisonienne, il a été beaucoup écrit. En résumant, elle consistait en un travail acharné, des moyens matériels et humains, donc financiers, importants, en balayant toutes les solutions possibles sur chaque problème partiel. Stratégie entraînant une trop forte priorité de l'action sur les temps de réflexion. S'il avait réfléchi aux résultats de ses prédécesseurs, il gagnait un an.

Donc, après l'enthousiasme du début, on constate que le platine des *burners*, les filaments, se désagrège à température élevée. Une dizaine d'autres métaux, iridium en particulier ne donnent pas de meilleurs résultats. L'examen au microscope des filaments montre qu'ils sont creusés de nombreuses mini cavités, et Upton pense que ce sont des petites bulles d'hydrogène qui s'échappe brutalement des pores du platine quand il est trop chauffé. En janvier 1879, la nécessité d'essais dans le vide commence à s'imposer, mais il faut une pompe de Sprengel ; le professeur Barker sollicité devrait pouvoir la prêter. En attendant on se contente d'une ancienne pompe mécanique. Avec Francis Jehl la solution est trouvée, augmenter progressivement la température du platine, tout en faisant le vide, pour permettre au gaz occlus de s'échapper sans creuser ces petits cratères. Mais Edison en déduit une interprétation douteuse, le point de fusion du platine normalement à 2000° C devrait pouvoir être porté par ce procédé à peut-être 5000° C.

Il est à remarquer que Swan avait rencontré un problème semblable avec son filament de carbone et adopté la même solution, faire le vide tout en portant le filament au rouge.

Le difficile problème de la pompe à vide demandera des mois. L'association d'une pompe de Geissler avec une trompe de Sprengel sera opérationnelle à Menlo Park en août 1879 grâce au fournisseur Reinmann et Baetz, faisant un vide de 1/100 000 d'atmosphère.

Il s'était aussi procuré aussi une dynamo Siemens. Il constata que la meilleure était celle de Gramme, adopta son collecteur, mais l'induit en tambour de Siemens qui lui paraissait peut-être plus simple à construire. Il eut des difficultés pour l'enroulement de cet induit, que les Européens cherchaient eux-mêmes à améliorer. Par contre, pour l'inducteur, Upton donna à l'électroaimant une hauteur et section surprenante, *three feet,* et *six inches* de diamètre, totalement inutiles et néfastes, résultat d'un calcul ou d'un raisonnement resté incompréhensible, comme d'ailleurs le sobriquet qui lui a été donné de « *long-legged Mary-Ann* ». Qui était cette Mary-Ann aux longues jambes ?

Edison type Z- 60 lampes

Cette première dynamo, type Z dans la gamme à venir, était prévue pour 60 lampes de 16 bougies sous 110 volts, et 45 A (m) ; elle demandait 8 HP de puissance mécanique, mais avec un rendement faible, 58,7% d'après le professeur John Hopkinson qui recalcula les machines Edison en 1883 et portera le rendement du type Z à 92%, tout en réduisant son poids. La machine était lourde, 1250 kg d'acier et de cuivre, plus du double d'une machine Gramme de même puissance ; une machine actuelle équivalente pèserait 40 kg.

La technique des machines n'était pas encore bien définie et leur fabrication demandait de l'expérience et de fortes connaissances en magnétisme et en électricité, probablement assez sommaires dans l'équipe d'Edison. Celui-ci aurait eu intérêt à s'entendre avec un constructeur de machines confirmé, mais par principe, tous les éléments électriques de son système d'éclairage devaient être fabriqué par lui. Ainsi, il pourra affirmer plus tard à des clients souhaitant n'acheter que ses lampes, qu'elles fonctionneraient mieux avec le courant de ses propres machines.

En 1881, une deuxième machine pour 250 lampes fut fabriquée, elle comportait six noyaux d'inducteurs semblables aux deux de la petite machine ; la puissance mécanique nécessaire pour ce modèle K était de 32 HP. Après reprise de sa conception par Hopkinson, ce modèle L avec rendement amélioré, nécessitait seulement 18 HP mécanique et son poids était réduit à 2600 kg.

Une troisième machine type C, record de puissance, plus de 100 HP, pour 1000 lampes sera réalisée pour l'exposition de Paris.

La lampe à filament de carbone

Le brusque changement d'orientation vers le carbone, en octobre 79, était d'abord motivé par l'échec du platine ne permettant pas une lampe à forte résistance pour la tension élevée à envisager de 100 volts ; s'y ajoutait la nouvelle reçue d'un correspondant d'Edison qui avait assisté à une présentation par un gentleman (probablement Swan) d'une lampe au carbone, à Newcastle en décembre 1878. Edison se procura l'article de Proctor dans le journal de la Société Chimique de Newcastle. Il connaissait ses concurrents américains Sawyer et Farmer qui utilisaient le carbone dans une ampoule d'azote, de même Maxim plus avancé, mais cet anglais inconnu devait l'inquiéter. Edison commence donc en reprenant comme filament du papier ou du bristol découpé puis carbonisé. C'est la solution simple qu'il avait tentée en 1877 au cours de quelques essais restés sans suite.

Ensuite sont testés toutes sortes de matériaux fibreux organiques ; malgré la bonne maîtrise du vide maintenant acquise, les lampes durent moins d'une heure.

On découvre que la résistance du carbone à froid est bien plus élevée qu'à chaud, l'inverse d'un métal. Il faut donc faire les essais avec une tension suffisante pour amener le filament à haute température. La recherche de matériaux fibreux, autres que le papier ou bristol, conduit à essayer tout simplement du fil à coudre en coton, dont le diamètre normalisé dans le commerce est classé par numéro.

Un spécialiste allemand du vide ayant travaillé avec Geissler est embauché, Ludwig Boehm, à un salaire élevé, 20 $ par semaine, puis 30 ; et à la fin de l'année le millionième d'atmosphère sera atteint en 20 minutes. Plusieurs opérateurs travaillant trop longtemps avec ces trompes à mercure furent gravement intoxiqués.

Mais un autre problème est tardivement découvert vers avril, le filament de platine est peu résistant et la lampe n'a besoin que d'une dizaine de volts. Il faudra en mettre une dizaine en série pour atteindre la tension souhaitable d'une centaine de volts. Le platine n'est que 7 fois plus résistant que le cuivre, 20 fois s'il contient 15 % d'iridium. Il faut diminuer la section à la limite de la fragilité mécanique et augmenter la longueur. Cela nécessite d'enrouler le long filament sur un support isolant tenant à haute température.

Malgré des essais peu concluants d'une centaine d'isolants réfractaires, Edison annonce à la presse que ses recherches s'orientent maintenant vers un nouveau concept qu'il aurait découvert, *la lampe à haute résistance*. Ce que ses prédécesseurs avaient compris depuis des années. En parallèle, Edison mobilise nombre de relations pour rechercher en Amérique ou plus loin, toutes possibilités pour trouver des mines de platine et ne pas dépendre pour le cœur de la lampe de fournisseurs extérieurs.

À la fin de l'été, la nécessité d'un régulateur électromécanique ou pneumatique complexe est enfin abandonnée. On comprend mal cette obsession d'Edison, ou d'Upton pendant un an de contrôler le courant pour éviter la fusion du platine, comme s'il ignorait les lois d'Ohm et de Joule. Si nécessaire, c'était la tension d'alimentation qu'il fallait stabiliser pour toutes les lampes d'un circuit, comme on le fit plus tard, mais pas l'intensité traversant chaque lampe individuellement.

Quelques lampes à filament de platine fonctionneront ainsi sans régulateur, elles durent quelques heures, mais leur résistance de quelques ohms est bien trop faible.

Le moral n'était pas très élevé à Menlo Park après l'été 79 et un an de travail sans résultat.

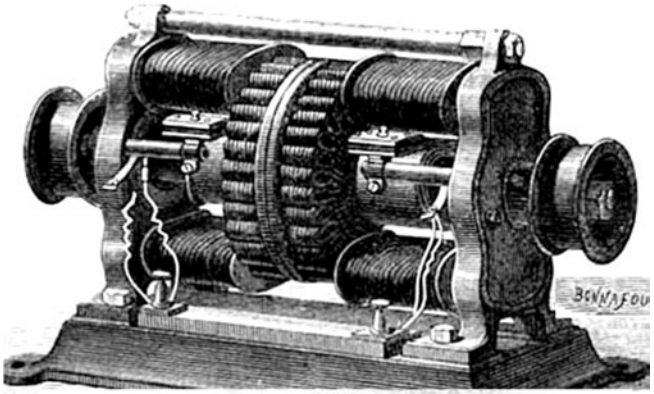
En octobre, changement complet de cap, le filament de platine est enfin abandonné pour le carbone. Cette année de recherches sur la lampe n'a pas été totalement inutile, la maîtrise du vide a été acquise et sans le réaliser encore, Edison avait trouvé avec le platine le moyen d'éliminer les gaz occlus, problème qu'il aurait retrouvé avec le carbone, comme Swan.

La génératrice électrique

C'est après la lampe, le deuxième pilier du système d'éclairage édisonien. Il avait été étudié en parallèle avec une autre équipe. Mais là Edison ne partait pas dans l'inconnu relatif de la lampe, des générateurs valables existaient depuis quelques années.

Il suffisait de les copier, leurs brevets de protection étant inexistants ou mal pris. Il y avait les machines à courant continu, toutes avec le collecteur Gramme et certaines à courant alternatif, destinées au début uniquement aux lampes à arc. Le choix du continu semblait évident, surtout avec la véritable allergie à l'alternatif que manifestera Edison dix ans plus tard.

Après sa visite à Ansonia chez Wallace, il lui acheta une machine, d'abord pour avoir de l'électricité pour ses essais, plutôt qu'avec les piles, puis une seconde. La génératrice Wallace Farmer,(l) copie incertaine de celle de Gramme ne s'avérait pas très performante, ce qu'il déclara à la presse et ne plut pas à Wallace qui l'avait bien accueilli et aidé à démarrer.



1 Machine à lumière Wallace-Farmer.

Il ne réussit pas à obtenir celle de Brush, principal installateur américain de lampes à arc, ni celle de Weston qui en débutait la fabrication. Il disposait d'une machine Gramme, probablement l'une de celle qu'avait laissée Fontaine à Philadelphie deux ans auparavant.

Le 21 octobre, un filament de coton en fil d'un centième d'inch, raccordé sur des fils de platine et carbonisé donne une lumière de 4 candles, pendant 3 heures, avec le courant d'une batterie Bunsen de 18 éléments, soit une trentaine de volts. Différents diamètres donnent des résultats variables et c'est finalement le n° 9 qui donne les meilleurs résultats. Batchelor allume la lampe à 1h 30 du matin avec la batterie de 18 éléments, elle donne 1/2 candle ; à 15 h, après 13 h 30, il ajoute plusieurs éléments à la batterie, la lumière atteint 30 candles, soit 3 becs de gaz, pendant une heure avant que le verre casse.

o Lampe Edison 1880

Ce jour est considéré comme celui de l'invention. Le brevet U.S. de cette lampe sera pris le 4 novembre et complété le 27 janvier 1880. Mais Edison s'obstine, dans le brevet, à vouloir faire des filaments enroulés en spirale comme pour le platine, pensant ainsi accroître la surface de rayonnement. C'est difficile avec le carbone moins souple, Upton arrive finalement à le convaincre d'adopter la forme classique en fer à cheval. (o)

Il est à noter que depuis plusieurs mois, Swan avait un résultat meilleur avec presque le même procédé, mais avec du coton tressé et traité à l'acide avant carbonisation.

Devant ce début de succès, on redouble d'effort à Menlo Park dans toutes les équipes de Batchelor, Upton, Kruesi, Jehl et autres.

Les travaux se poursuivent pour trouver de meilleures substances pour le filament, 260 seront essayées, au hasard suivant la méthode édisonienne.

Le show financier

Edison avait besoin de tenir en haleine la presse et rassurer ses financiers inquiets d'une année sans résultat concret, en particulier Fabri, représentant le puissant banquier J.P. Morgan. Il est alors décidé l'organisation de visites à Menlo Park, éclairé par quelques dizaines de lampes, tenant au moins quelques heures. Surtout pour les hommes d'affaires, il était important de présenter les éléments du système complet Edison, autres que la lampe, les générateurs, compteur et accessoires divers, mais aussi prouver par des chiffres, que l'éclairage électrique était plus économique que le gaz pour l'usager et plus rentable pour l'investisseur.

Survint une querelle de chiffres, car Edison annonçait que son système apportait l'équivalent de 10 becs de gaz par cheval. Le professeur H. Morton faisait remarquer dans le *New York Times* que la lampe à arc produisait la lumière de 100 becs de gaz par HP, ce qui était malheureusement vrai.

Pour l'événement, Edison et Upton préparent avec leur ami, le reporter Marshall Fox du *New York Herald*, une pleine page qui sera le plus important scoop de la carrière du journaliste : *« EDISON LIGHT. The Great Inventor's Triumph In Electric Illumination - It Makes a Light, without Gas or Flame, Cheaper Than Oil. Complete Details of the Perfected Carbon Lamp… »*

Cette page paraîtra le 21 décembre 1879. Le 27 décembre, la journée est réservée aux investisseurs et financiers, c'est une réussite et Upton note : *plusieurs millions de dollars en capital sont représentés.* De longues explications leur sont données sur le plan économique et financier de ce système moins cher que le gaz, avec de multiples autres avantages.

Tous les *newspapers* tiennent en haleine le public sur la préparation de la grande journée portes ouvertes à Menlo Park pour la fin de l'année, le *New Year's Eve*, à laquelle des trains spéciaux déversèrent le public en foule qui s'extasie devant ce show très bien organisé.

Un moteur à vapeur a été approvisionné en urgence pour faire tourner la dynamo Z, alimentant 50 lampes simultanément. Les responsables donnent des explications détaillées sur ce *système d'éclairage* comprenant tous les éléments depuis le générateur jusqu'aux lampes. Des essais spectaculaires sont présentés : une lampe est plongée dans une jarre d'eau, puis allumée sous l'eau pendant quatre heures ; une autre est soumis à des allumages et extinctions rapides, reproduisant 30 ans de fonctionnement journalier (5).

Cette journée eut un fort retentissement, jusqu'en Europe où le scepticisme latent concernant le personnage fut un peu émoussé. En Angleterre, même les travaux de Swan n'étaient connus que par une minorité de spécialistes, quant à Lane Fox, il était inconnu.

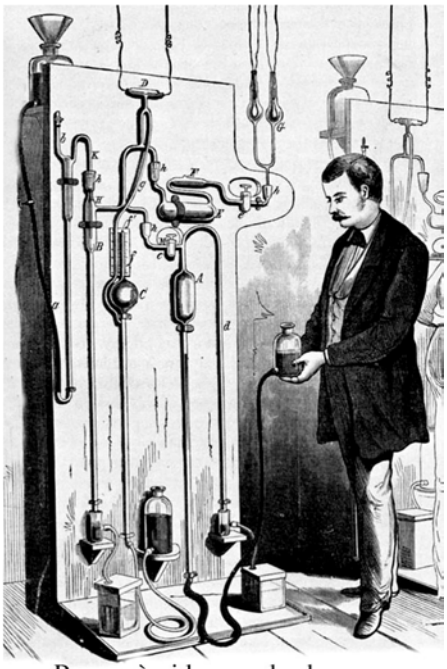
L'année 1880

Après la réussite du show de fin d'année 79, le succès de l'ensemble du projet semblait possible, mais il y avait encore du chemin à faire sur de multiples points.

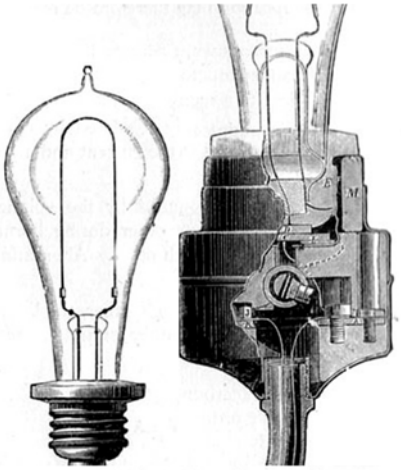
La lampe en était le principal. Une lampe avait atteint 550 heures en janvier, mais ce n'était pas constant. On constatait parfois le noircissement du verre. La jonction du filament aux connections de platine n'était pas très au point et coûteuse. La recherche d'un filament meilleur que le fil de coton parmi de multiples autres possibilités nécessitait de nombreux essais. Batchelor conçut une méthode accélérée, au lieu de faire chaque essai avec un courant donnant une lumière de 16 candles, valeur étalon, on les faisait à 40 candles ; ce qui réduisait la durée à quelques heures ou minutes, d'où une sélection rapide des meilleurs filaments.

Une opportunité intéressante se présenta au printemps, l'installation de l'éclairage électrique sur un navire. Henry Villard, chef de la compagnie de navigation de l'Orégon avait assisté enthousiasmé à la présentation du 1er janvier. Son vapeur côtier, *Columbia* étant en chantier au port de New York, il demanda à Edison d'y installer l'éclairage électrique. Celui-ci hésitait, les lampes n'étant pas très au point et surtout ce genre d'installation particulière n'était pas dans ses objectifs, il vendrait le matériel, mais pas l'électricité en permanence après, plus rentable. Son entourage le persuada d'accepter pour la publicité que ferait cette première installation d'éclairage. Quatre dynamos type Z furent installées, dont l'une fournissait le courant d'excitation aux trois autres. Cela se révéla très utile pour mettre au point ou créer différents accessoires comme des fusibles et les fils isolés au coton. Une description détaillée de cette première parut dans le *Scientific American*.

Cela retarda un peu la recherche d'un meilleur filament. La fibre de différents bois fut essayée, puis de la filasse, et en juillet plusieurs types de bambous. Celui dénommé japonais s'avéra le meilleur et fut définitivement adopté (6). Deux puissances de lampes furent normalisées, la plus courante, le type A de 16 candles, à peu près 16 bougies, nécessitait environ 50 W de puissance ; le type B de 8 candles et plus tard le type C de 32 bougies ;



p Pompe à vide pour les lampes



q Culot à vis Edison

Simultanément on préparait l'industrialisation en concevant les outillages de fabrication, les moules pour carboniser les filaments, les pompes pour faire le vide dans des dizaines d'ampoules simultanément (p).

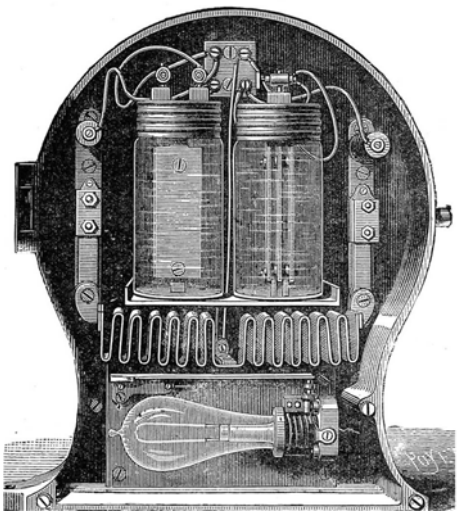
De même divers accessoires tels que la célèbre douille à vis, *lamp socket* (q).

Il ne faut pas oublier que le système Edison était un ensemble complet destiné à remplacer celui du gaz. Des calculs économiques basés sur des mesures techniques devaient vérifier que le système serait rentable en apportant un éclairage moins cher et meilleur que celui du gaz, à partir de la même quantité de charbon. La source du revenu devant être le prix du courant utilisé par les lampes, il fallait un compteur d'ampères/heure correspondant au compteur de litres du gaz.

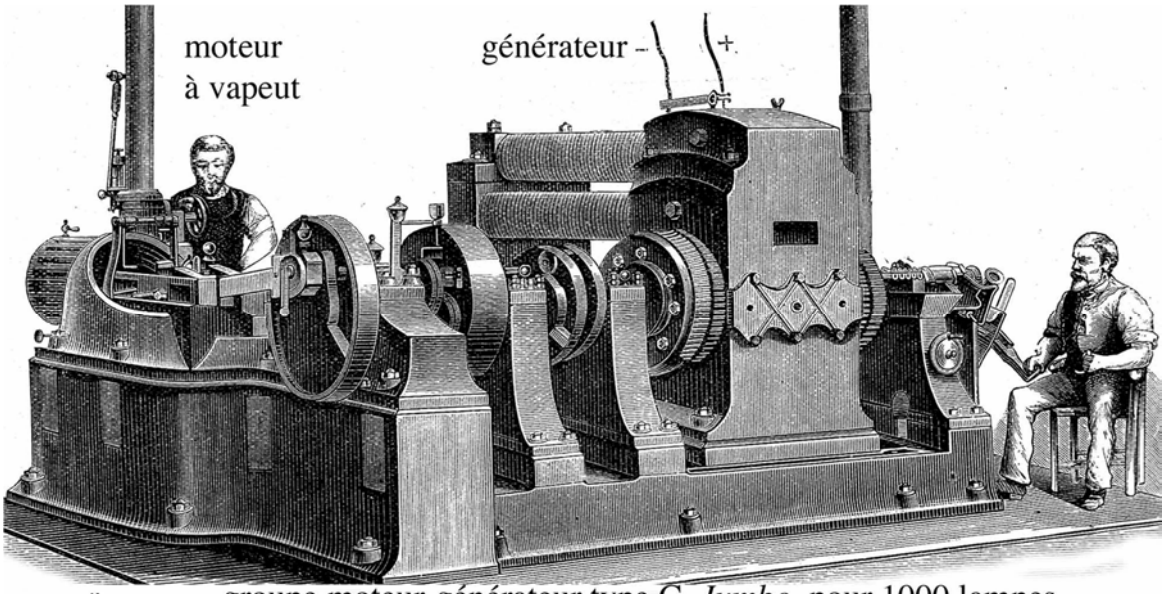
Le chimiste de Menlo Park, John Lawson imagina un système assez compliqué de deux voltamètres avec des électrodes de zinc dans un bain de sulfate de zinc. La pesée mensuelle de la quantité de zinc déposé sur l'une des électrodes serait proportionnelle au courant et au temps (r).

Edison songeait déjà à sa première installation, nécessairement très importante à la fois pour des raisons de prestige et de rentabilité,

pour fournir la lumière à tout un quartier de New York. Il faudrait alors une génératrice très puissante, 100 à 120 HP pour un millier de lampes. Une puissance pas encore atteinte par les autres constructeurs. Ce fut la tâche de Charles Clarke, responsable du *power engineering.* Pour le moteur à vapeur qui devait l'entraîner, une machine Porter-Allen fut envisagée et l'on pensait qu'il n'était plus possible, pour cette puissance, de le faire classiquement par courroie, le moteur à vapeur devrait entraîner directement la génératrice par accouplement sur le même arbre.



r Compteur électro-chimique Edison



s groupe moteur-générateur type C, *Jumbo,* pour 1000 lampes

Un prototype fut réalisé pour la fin de l'année. L'ensemble moteur et générateur pesait 30 tonnes, tournait à 350 tours/minute en fournissant 500 A à 103 volts, soit l'énergie pour 700 lampes ; puissance portée ensuite à 1000 et 1200 lampes (s). Sa taille l'avait fait surnommé *Jumbo*, nom de l'éléphant du célèbre cirque Barnum.

En parallèle, le financier Lowrey cherchait à intéresser John S. Morris, *Président of New York City Board*, en vue d'obtenir son appui pour l'installation d'éclairage envisagée. Une présentation fut organisée à Menlo Park le 21 décembre. L'accord de principe fut ainsi obtenu pour construire à New York une première station centrale, distribuant l'électricité aux usagers environnants par des câbles souterrains.

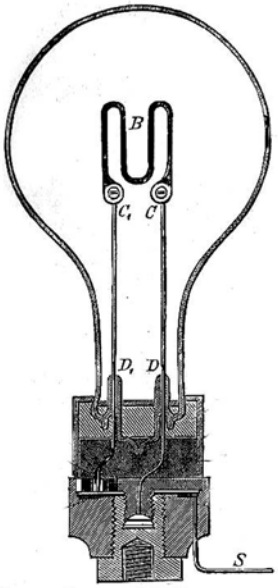
Il fallait se hâter, car trois jours avant, Brush avait inauguré l'éclairage de Broadway avec ses propres générateurs et lampes à arc.

Pour le 1er janvier le show public de l'année précédente fut renouvelé, mais sous forme d'un *Illumination and Economic Test,* organisé sous le contrôle de Clarke, en utilisant le courant fourni par le prototype de la puissante génératrice type C (7)

Le **début de 1881** fut consacré à la mise en place des différents centres de fabrication et à la préparation de l'exposition de Paris. Batchelor y fut envoyé des mois à l'avance, car Edison considérait cet évènement comme un moyen inespéré pour étonner le monde et conquérir le marché européen. Lui -même installe ses bureaux à New York dans la 5e avenue - la *Edison Lamp Company* dirigée par Upton est démarrée à Menlo Park - Dean dirige la *Edison Machine Works* pour la fabrication des générateurs et Kruesi la *Edison Electric Tube Company* pour les conducteurs souterrains.

Mais Edison ne cherche pas au début à vendre des installations d'éclairage autonomes (*isolated)* à des particuliers ou entreprises, mais de véritables réseaux urbains vendant l'électricité à tous les habitants d'un quartier. Il ne peut cependant pas refuser l'équipement de quelques installations individuelles, mais prépare son premier « grand coup », l'éclairage de Pearl Street District à Manhattan.

La lampe Maxim

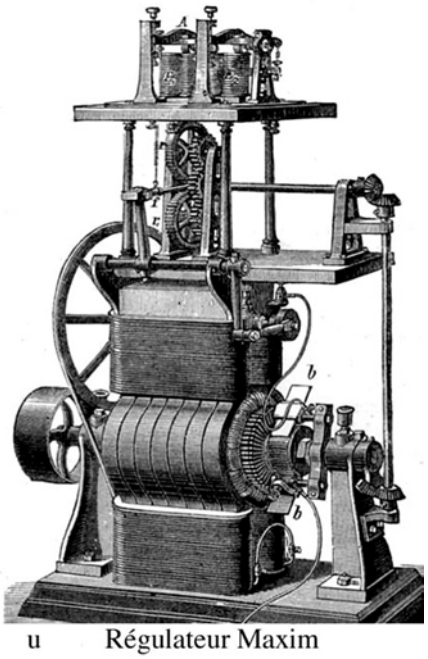


t Lampe Maxim

Cette lampe a été développée simultanément avec celle d'Edison. Son élaboration mériterait d'être analysé comme les précédentes, mais l'on ne dispose pas de sources approfondies à son sujet, comme pour les lampes Sawn et surtout Edison. Hiram Maxim (8), américain du Maine, se lança lui aussi dans l'éclairage électrique en 1878. Après probablement nombre d'essais, avec l'assistance de J. Nichols, sa lampe industrialisée était aussi à filament de carbone dans le vide, mais sa fabrication était originale.

Le filament est découpé, en forme de M dans du carton bristol et subit un début de carbonisation entre deux plaques de fonte chauffées. Il est connecté aux fils de platine d'amenée du courant par de minuscules vis, lesquels traversent le verre par un émail spécial évitant ainsi les défauts d'étanchéité résultant de la dilatation à la chaleur différente entre le platine et le verre.(t)

L'ampoule est vidée d'air avec une pompe à mercure et ensuite remplie de vapeur de gazoline, puis presque vidée de cet hydrocarbure à une pression de 1,25 inches. Un courant, faible au début chauffe le filament entraînant le dépôt de carbone dans les microfissures du bristol. Le courant est ensuite progressivement augmenté en pompant la vapeur d'hydrocarbure et éliminant les gaz occlus. Cette opération originale de *nourrissage* d'un filament de carbone lui confère une bonne homogénéité, donc une résistance constante, évitant des points chauds, sujets à rupture. De plus la résistance du filament peut être ajusté avec précision en prolongeant plus ou moins le nourrissage. Cette méthode, mise au point avec l'aide de Lewis Latimer (9), fut adoptée dans les années suivantes par d'autres fabricants.



u Régulateur Maxim

La grande surface de rayonnement du filament plat en M donnait à la lampe une intensité lumineuse plus élevée, 14 candles, que les autres lampes à filaments fins.

La lampe Maxim était aussi l'élément de base d'un système complet, comprenant une génératrice et son excitatrice avec régulateur.

La génératrice était du type Gramme, mais avec deux collecteurs disposés de chaque côté, permettant d'alimenter deux circuits soit en série pour une tension plus élevée, soit séparés, l'un pour des lampes à arc, l'autre pour de l'incandescence.

L'excitatrice du type Siemens était associée à un régulateur original ajustant automatiquement le courant d'excitation à la charge variable de la génératrice par décalage des balais (u). C'était le premier système de régulation qui complétera le système *compound,* imaginé par Gramme, un inducteur de la génératrice étant en série avec le courant principal un deuxième branché en parallèle aux bornes.

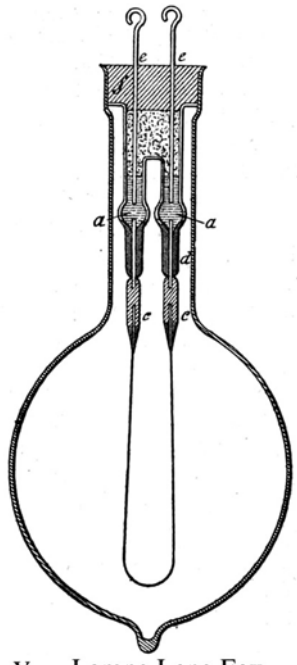
Le système Maxim était fabriqué à Bridgeport dans une importante usine avec 1000 personnes, par l'*United States Electric Lighting Company,* fondé en association avec Weston, dont Latimer était le directeur adjoint. Commercialisé dès 1880, il équipa avant celui d'Edison, les premières installations d'éclairage à incandescence en Amérique à New York, San Francisco et Portland comme en Angleterre. Au début de 1881, il installa à Paris une agence pour préparer cette exposition qui devait faciliter sa pénétration sur le marché européen, l'*United States Electric Lighting Company,* mais la compétition allait être commercialement très dure avec Edison.

La lampe Lane Fox

Un jeune Anglais de 22 ans, St George Lane Fox Pitt, entreprenait lui aussi en 1878 la fabrication d'une lampe à incandescence et déposait plusieurs brevets. Comme pour la lampe précédente, on dispose de peu d'informations sur sa conception. (10)

Il commença lui aussi avec des filaments de platine, puis de platine-iridium, dans une ampoule remplie d'azote et se tourna finalement vers le carbone.

Son filament était aussi une fibre végétale, de la fibre de bouleau ou de chiendent dont on fait des balais ou tapis-brosse, nettoyée à la potasse puis traitée au soufre avant d'être carbonisée dans un moule en plombagine. Suspendu dans un globe contenant du benzol il était porté à incandescence. Le gaz décomposait dépose alors des particules de carbone sur les parties les plus chaudes, donc les plus minces. Ce procédé de nourrissage, semblable à celui de Maxim, donnait des filaments homogènes sans points faibles.



V Lampe Lane Fox

Les connexions de sortie paraissent assez compliquées (v) : les filaments sont reliés par des manchons de carbone c à des fils de platine d scellés dans le verre, lesquels trempent dans une cupule de mercure assurant la connexion avec les fils de sortie en cuivre. Le col de la lampe est bouché avec de l'ouate de coton puis du plâtre. Lane Fox faisait le vide avec une pompe artisanale de son invention semblable à celle de Geissler. Comme Swan et Edison, il procédait au dégazage des gaz occlus en chauffant le filament au rouge pendant l'opération de vide. Comment a-t-il découvert ce procédé ?

Cette lampe donnait des résultats valables, mais sa conception était peu adaptée à une fabrication industrielle. Pourtant, en février 1881 était créé la *Lane Fox British Electric Light Company* avec comme ingénieur en chef le professeur Forbes, personnalité du monde électrique. On mentionne avant l'exposition la mise en service d'une installation privée et d'un éclairage de la gare de Manchester.

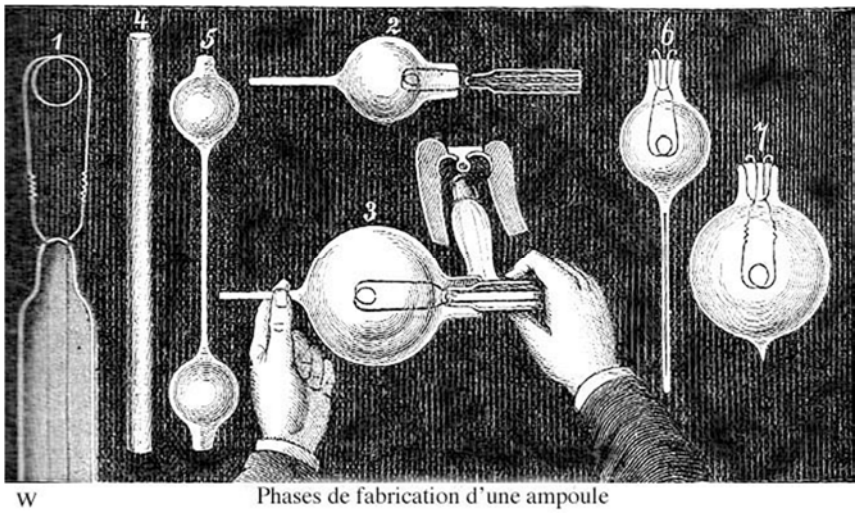
La lampe Sawyer et Man

Ces deux Américains avaient cherché en 1878 à traiter le charbon par le gaz d'éclairage et réussirent à carboniser ainsi un ruban de papier ; en juin 1879 leurs lampes fonctionnent plusieurs semaines. Bien que cette lampe ne figurât pas officiellement à côté des quatre autres à l'exposition de Paris, elle mérite mention. De même les essais antérieurs de Moses Farmer et ceux plus récents d'Edward Weston, dont les brevets gênaient beaucoup Edison.

Analyse de l'invention

La lampe à incandescence fut une invention importante, essentiellement par ses conséquences. Venant compléter la lampe à arc, l'ensemble va déclencher la généralisation de l'éclairage électrique, partout et pour tous, une profonde révolution des modes de vie et de travail. Avec le télégraphe et le téléphone, l'éclairage a été l'une des innovations spectaculaires qui impressionnera le public de l'exposition sur l'électricité de Paris.

Quant aux difficultés rencontrées par les inventeurs, cette innovation n'était déjà pas conditionnée par une découverte scientifique particulière. Sur le plan technique, si l'on considère que le problème essentiel d'obtenir un bon vide était à priori résolu, ce furent surtout nombre de difficultés technologiques de détail, la fabrication et la connexion d'un filament de carbone essentiellement, qu'une demi-douzaine d'expérimentateurs ont résolue simultanément en deux ou trois ans, par des solutions assez proches (w).



W Phases de fabrication d'une ampoule

D'autres particularités de cette invention sont à souligner, ne serait-ce que pour classer définitivement dans la légende, qu'elle est due à un savant de génie, Edison, le *Wizard of Menlo Park*, qui aurait réussi là, avant et mieux que quelques autres, supposés n'être que des suiveurs.

– Entre les quatre développeurs reconnus, les chroniqueurs à la recherche du *premier qui…* aurait réalisé une lampe au point, prête à la commercialisation, peuvent attribuer la palme à Swan, devançant de près d'un an les trois autres challengers, ainsi que le témoignent les lampes présentées au Science Museum de Londres (x). Résultat faussé par l'exploitation juridique de la protection par brevets. Swan et Maxim avaient commercialisé leurs lampes des mois avant les deux autres.

– Qualité et performances des quatre lampes étaient sensiblement équivalentes, ce que les essais comparatifs par experts indépendants ont démontré à l'occasion de la prochaine exposition de 1881 (III-4). La lampe Lane Fox était cependant d'une réalisation industrielle assez compliquée.

– Suivant l'exemple de Brush et Jablochkoff pour l'éclairage à arc, Edison fournissait un *système* d'ensemble très complet, génératrice, régulateur d'alimentation, lampe, accessoires d'installation et compteur, cependant ses génératrices avaient un rendement médiocre et son régulateur manuel ne fut automatique qu'en 1882. Maxim avait des génératrices avec régulateur plus performant. Swan et Lane Fox n'avaient comme équipements associés que la lampe et ses supports, le reste étant fourni par des constructeurs spécialisés, ce qui n'était pas un inconvénient.

L'avenir le prouvera, encore de nos jours la lampe est un produit électrique indépendant d'autres machines ou appareils.

– Chacun avait cherché à protéger sa réalisation par des brevets, mais la supériorité d'Edison était écrasante, environ 300 brevets au total, déposés par des juristes compétents – seulement une dizaine de brevets pour chacun des trois autres, pris parfois trop tardivement.

– Le coût de développement a été très élevé pour Edison, approximativement $ 200 000, compte tenu de son staff d'une dizaine de responsables et plus de 50 ouvriers pendant deux ans et demi, mais il perdit temps et argent pendant un an sur la solution sans issue du filament en platine. Sans chiffres précis, si l'on estimait le coût relatif de développement pour Edison à 10, pour Maxim il serait au plus de 3, pour Swan de 2 et pour Lane Fox moins de 1.

– Par ailleurs, il est étonnant qu'un jeune de 22 ans sans expérience technique ni industrielle, Lane Fox, arrive à un niveau très proche des autres, avec des moyens matériels certainement beaucoup plus réduits.

On peut en conclure : Ce n'était donc pas si compliqué que cela de faire une bonne lampe à incandescence ! Par contre la bataille commerciale, menée par Edison, qui allait suivre fut très dure.

Les objectifs visés par chaque développeur étaient différents :

– Edison voulait à l'origine substituer l'électricité au gaz pour l'éclairage domestique urbain, il ne comprit qu'ensuite la nécessiter de livrer aussi des installations particulières autonomes.

– Maxim ne visait que ce deuxième marché.

– Swan se limitait à la fabrication des lampes, laissant les spécialistes de machines, Crompton, pour fournir l'électricité. Chacun son métier !

– Lane Fox suivait l'objectif de Swan, mais sans expérience ni soutien industriel.

Quel serait alors l'inventeur de la lampe à incandescence ?

Question sans objet puisqu'ils sont au moins quatre presque ex-aequo ! Le matraquage publicitaire orchestré dans la presse par les *communicants* d'Edison au moment et après l'exposition (III-4) n'affirmait d'ailleurs pas qu'il avait inventé la lampe à incandescence, mais un nouveau système complet d'éclairage pour remplacer le gaz, **la lumière Edison.**

Bien plus que la lampe elle-même, l'innovation d'Edison a été une puissante et habile manipulation de l'opinion que nos experts en *marketing* d'aujourd'hui ne peuvent qu'en admirer la stratégie efficace, analysée ci-après.

À noter que les inventeurs de la lampe étaient quatre américains et deux anglais. Il est un peu surprenant qu'aucun des pays européens du continent, France, Allemagne, Italie et autres, soient resté à l'écart de cette invention, tout à fait dans l'air du temps. Ils prendront vite le train en marche, dès 1882.

À la veille de l'exposition de Paris, l'histoire de la lampe à incandescence n'en est pourtant qu'à ses débuts. Ses développements sont analysés au chapitre 5 suivant.

Compléments

0 - Parmi le grand nombre de documents et articles de revue sur ce sujet, en particulier sur Edison, on peut considérer comme des références valables :

Sur **Swan** :

M. E. SWAN & K.R. SWAN, *Sir Joseph Wilson Swan,* FRS, London, 1929.

KENNETH R. SWAN, K.C., *Sir Joseph Swan and the Invention of the Incandescent Electric Lamp,* British Council by Longmans, Green and Co, London, New York, Toronto,1946.

C.N. BROWN BSC, *JW Swan and the invention of the Incandescent Electric Lamp,* Science Museum, London, 1978. Très abondante bibliographie.

Les revues *The Engineer,* et en particulier,*The electrician* 1887-88

Sur **Edison** :

ROBERT FRIEDEL & PAUL ISRAËL, *Edison's Electric Light - Biography of an Invention*, Rutgers University Pressa, New Brunswick, New Jersey, 1986

Plaquette commerciale, *La lumière Edison*, Imprimerie Lahure, Paris, 1882

Les importantes archives d'*Edison National Historic Site* à West Orange, New Jersey.

La revue *Scientific American.*

– Des foules de documents traitent d'Edison, mais confondent malheureusement trop souvent histoire et mythe.

– Collections et **photos** de lampes anciennes : bulbcollector.com - edisonian.com - sparkmuseum.com

1 - Nombre d'inventions ou découvertes n'ont pu se réaliser qu'après une autre **découverte « collatérale »** ou l'invention d'un *outil* spécifique, par l'inventeur lui-même, cas typique de Volta (I-3), ou par des prédécesseurs.

2 - HP est l'abréviation du horse power, presque égal au **ch**, le cheval-vapeur français. Bien que l'unité de puissance soit le watt, l'histoire doit rester dans les unités de l'époque, sans les convertir. Le horse power vaut 745,6 watts, le cheval-vapeur 736 W.

3 - L'invention du **phonographe,** attribuée généralement à Edison, lui apporta surtout une réputation, un succès d'image, plus que financier, malgré 101 brevets ; son appareil à rouleaux de zinc ou cire gravés en un seul exemplaire n'ayant guère de débouchés. Moins d'un millier furent vendus dans le monde, plus l'application ludique de poupées parlantes.

Bien qu'appareil non électrique jusqu'en 1925, il illustre la difficulté d'attribuer une invention à une personne autre que son premier réalisateur pratique. En résumé :

Le physicien Thomas Young (1807) traduit les vibrations d'un corps sonore en y attachant un léger style qui grave les vibrations sur une surface en mouvement.

L'ouvrier typographe Léon Scott présente vers 1860 à l'Académie son *phonautographe* : on parle devant une lame vibrante sur laquelle est fixé un stylet qui grave sur un tambour recouvert de noir de fumée. Il est félicité par les académiciens, mais l'appareil n'est pas réversible, pour reproduire le son.

En avril 1877, Charles Cros, physicien et poète atypique, ayant travaillé dans la photographie en couleurs et le télégraphe automatique (Wikipédia) présente à l'Académie un pli cacheté décrivant un appareil reproduisant les sons, le *paléophone.* Peu argenté, il n'a pas pu payer les 50 F du brevet et la construction correcte d'un bricolage qui fait sourire les académiciens, sauf qu'il reproduisait correctement le « merde » prononcé par son auteur.

En mars 1878, Puskas, représentant d'Edison, présente à la même Académie le *phonographe* reproduisant assez bien le son nasillard enregistré sur un cylindre d'étain tourné à la main. Edison l'avait breveté en décembre 1877, ignorant probablement ses prédécesseurs. C'est l'étonnement et l'enthousiasme. L'appareil est amélioré par Charles Tainter en 1889 et d'autres.

En 1888, l'allemand Emile Berliner invente le *gramophone*, permettant de graver sur des disques amovibles en ébonite qui peuvent en 1893 être dupliqué en série par galvanoplastie, c'était la condition du succès.

En 1925, le gramophone est électrifié et devient le pick-up radioélectrique.

Chaque année l'Académie Charles Cros récompense les meilleurs disques. À Fabrezan dans l'Aude, le curieux peut visiter avec émotion le modeste musée du paléophone de Cros, ce poète-inventeur désargenté et incompris à son époque.

4 - Edison appartenait plutôt à la catégorie des inventeurs de la Chine ancienne, pour qui l'application utile prime la compréhension d'un phénomène. À l'inverse, les anciens Grecs furent les innovateurs de la réflexion scientifique, orientée vers la découverte et l'explication des phénomènes de la Nature, sans se soucier de leur application pratique.

La seule découverte scientifique qu'il fit en 1883, en cherchant à diminuer le noircissement de ses lampes, a été *l'effet Edison* (V-4), la circulation d'un faible courant dans le vide. Le phénomène était dû aux électrons, particule encore inconnue, pressentie par Crookes et Stoney, découverte en 1897 par J.J. Thomson. Sans chercher à comprendre, cela pouvait servir à mesurer une quantité d'électricité, il

prit un brevet selon sa règle. Fleming comprit le phénomène et inventa alors la diode en 1904, première lampe à vide, la naissance de l'électronique.

C'est pourquoi le qualificatif de *savant* que la légende lui attribue est très exagéré, sinon erroné, c'était avant tout un développeur-bricoleur de génie, un entrepreneur infatigable, un inventeur-praticien, reprenant le plus souvent les idées d'autres, comme cela lui a été reproché à son époque. Ceci complété par un sens étonnant des affaires, de l'organisation industrielle, du marketing, de la communication et de la publicité. Il correspondait bien à l'état d'esprit d'une jeune nation qui en fit son héros industriel, pour s'affirmer au moins égale à ses origines, l'Angleterre et l'Europe.

Mieux que ses contemporains, il avait compris que le succès dépendait autant d'un bon cabinet d'experts juridiques en brevet, que d'un bon service de recherche.

Il se moquait parfois des scientifiques, ces hommes d'idées et de réflexion plus que d'action. Mais il en eu bien besoin, en particulier en électromagnétisme où ses connaissances théoriques ne dépassaient guère la loi d'Ohm. Il eut alors recours à un professeur anglais, Hopkinson, pour améliorer en 1883 ses dynamos au piètre rendement. Son obstination à nier, même en 1886, l'intérêt du courant alternatif en est d'ailleurs l'exemple le plus frappant de son incapacité à comprendre l'électricité (IV-2). Elle sonnera la fin de sa carrière, mais discrètement, car le mythe du savant restait trop utile aux banquiers.

En bref, un personnage heureusement hors du commun.

5 - Ces **essais spectaculaires** n'avaient pratiquement rien de dangereux pour les lampes. Dans le premier cas, la lampe était mieux refroidie dans l'eau que dans l'air ; dans le second, il faut savoir que le filament de carbone est beaucoup plus résistant à froid qu'à chaud, le courant est faible et la lampe carbone ne claque pas à froid. Ce sera l'inverse avec les filaments en métal, 20 ans plus tard, car les métaux sont moins résistants à froid qu'à chaud d'où un appel de courant élevé. Chacun a pu constater que les lampes actuelles à filament de tungstène claquent à l'allumage, rarement en service.

6 - Filament de bambou - Beaucoup d'histoires racontent l'envoi par Edison d'experts dans le monde entier pour trouver la meilleurs fibre de bambou. Il n'a pas été possible d'en vérifier l'authenticité ; elles relèvent sans doute des légendes qui émaillent nombre d'épisodes de la biographie de cet homme assez exceptionnel. Il faisait écrire sa légende par les journalistes de son vivant.

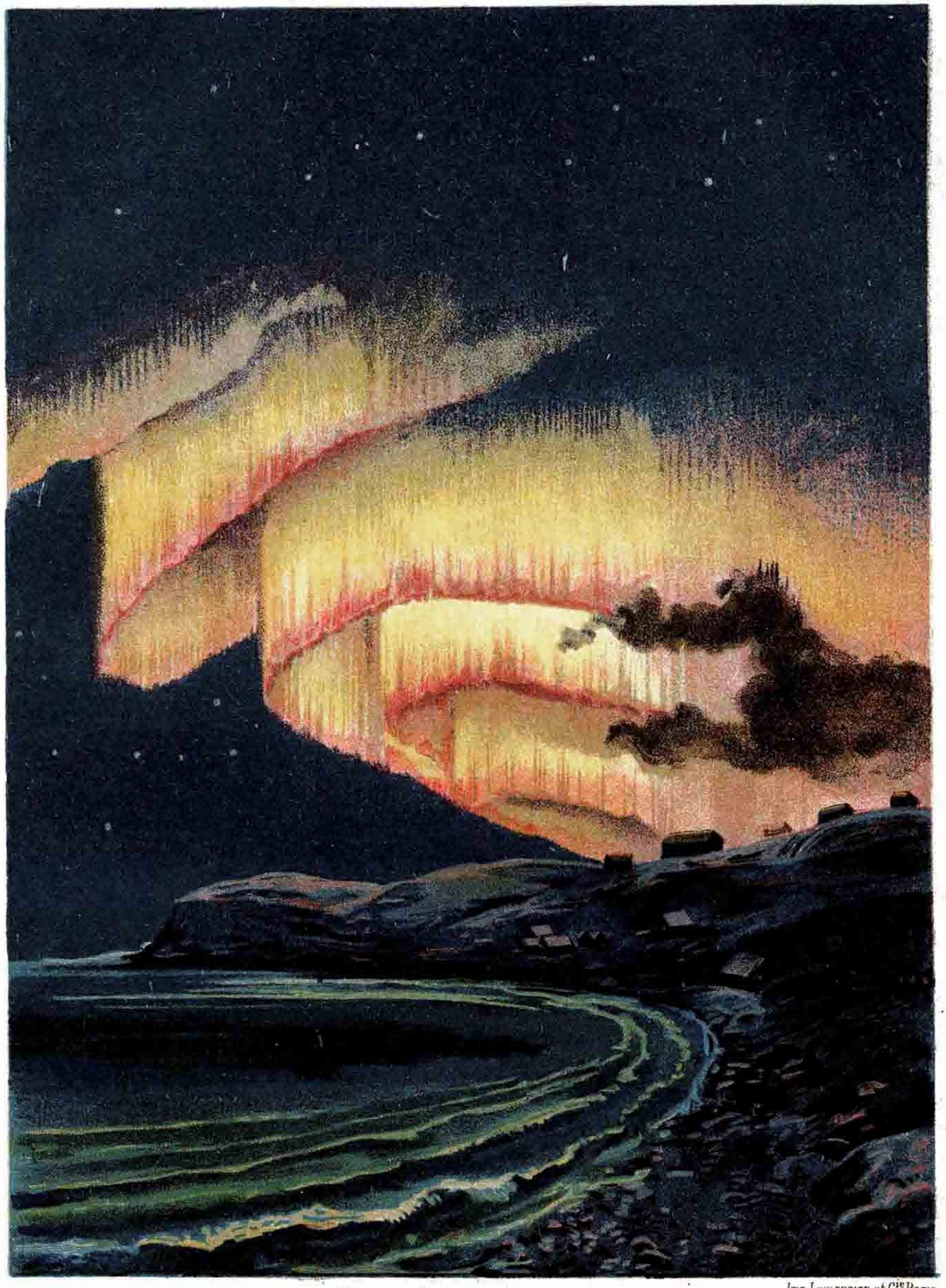
7 - Test : Le moteur développant 82,3 HP était alimenté en vapeur par la chaudière sous une pression de 110 lbs. et consommait 22,6 pounds de vapeur par HP et par heure. La grosse génératrice fournissait 61,9 HP à 408 lampes ; ce qui permettait donc d'alimenter 6,6 lampes par HP.

8 - Hiram Maxim - Après l'exposition de 1881, Maxim émigra à Londres où il transféra ses activités électriques. Découragé par les procès d'Edison il se tourna vers d'autres inventions et reste plus célèbre pour celle du fusil automatique à répétition, puis de la mitrailleuse, qui équipa l'armée britannique à partir de 1895. L'idée était d'utiliser le choc de recul du canon d'un fusil pour éjecter la douille et réarmer l'arme très rapidement. On sait le massacre que provoqua cette nouvelle arme de destruction massive, mais diffuse dans le temps et l'espace, à partir de la guerre de 1914 ; au moins 100 fois plus de morts que la bombe atomique 30 ans plus tard, mais étalés sur quatre années.

Ensuite il s'illustra dans les débuts de l'aviation en construisant plusieurs modèles qui ont réussi à voler. C'était un inventeur très éclectique.

9 - Lewis Latimer était le premier inventeur noir, doué d'une intelligence vive et brillante, il commença comme dessinateur chez Bell, puis fut un assistant précieux pour la conception de la lampe Maxim, dont il possédait des brevets pour le filament. Edison le débaucha ensuite en 1885 et il fut classé dans le groupe des 28 pionniers, les meilleurs collaborateurs d'Edison

10 - Lane Fox. Une source bien documentée et probablement fiable sur ses travaux est le site - frognet.net/~ejcov/**fox**pitt.html - basé sur 30 références bibliographiques, dont peu sont facilement accessibles.



Imp. Lemercier et Cie Paris

PHÉNOMÈNE ÉLECTRIQUE
DE L'ATMOSPHÈRE : **AURORE BORÉALE.**

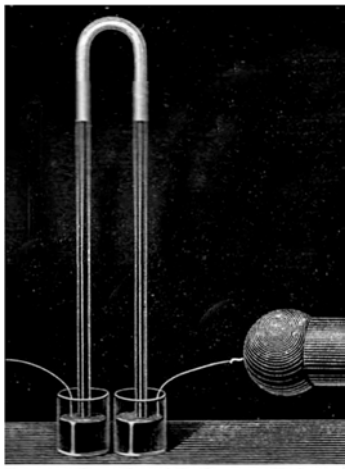
3 – La lampe à décharge

Dès la préhistoire de l'électrostatique, des expérimentateurs avaient remarqué l'apparition de lueurs dans l'air raréfié de globes de verre soumis à des tensions élevées. Au XIX^{e} siècle, beaucoup d'études de ce phénomène inexpliqué furent entreprises dans les laboratoires. La découverte des rayons X, puis de l'électron ont été le résultat imprévu de cette recherche (V-4). Ce n'est qu'au début du XX^{e} que le phénomène fut exploité comme un troisième moyen d'éclairage, le tube fluorescent. Après de lents progrès, il tend même depuis quelques décennies à supplanter en partie la lampe à incandescence, en raison de son très bon rendement lumineux, de l'amélioration des couleurs de sa lumière et de son utilisation devenue plus pratique sous forme de lampes, grâce à l'électronique.

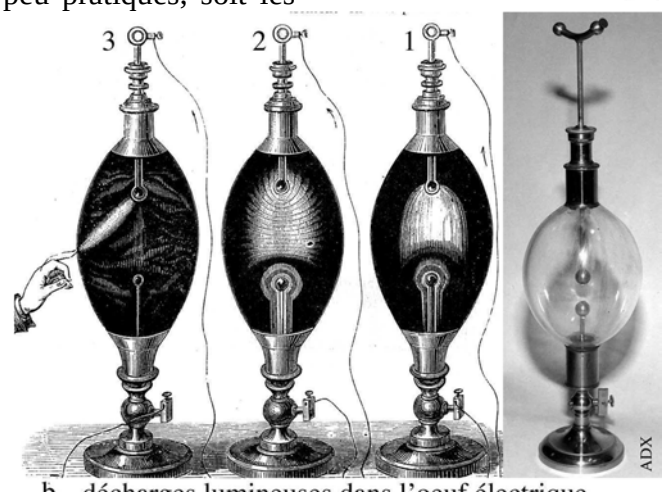
La lampe à arc, premier système d'éclairage, n'est en fait qu'un cas particulier de lampe à décharge, où l'arc électrique se développe librement dans l'air et à la pression normale. Son importance dans l'histoire nécessitait une place particulière (III-1). Dans toutes les autres lampes à décharge à venir, l'arc se manifeste sous différentes formes, dans l'air ou d'autres gaz, mais à faible pression.

Les premières lueurs

L'histoire commence donc avec l'anglais **Hawksbee** qui constatait en 1709 une étrange lueur mauve dans tube contenant du mercure, excité avec la première machine électrostatique à frottement (I-2). **Davy,** vers 1800, obtenait aussi cette lueur dans le vide barométrique d'un tube en U, haut de plus de 76 cm et rempli de mercure, renversé sur des cuves auxquelles on appliquait les milliers de volts d'une machine électrostatique (a).


Lueur dans le vide barométrique

Faraday, ce savant qui contribua à l'exploration de la plupart des phénomènes électriques de son temps se mit en 1838 à l'étude de ces lueurs avec des moyens rudimentaires. Il lui fallait pour obtenir de la haute tension, soit des machines électrostatiques peu pratiques, soit les centaines de piles en série de la Royal Society. Quant au vide, il n'avait que l'ancienne pompe à piston datant d'un siècle qui ne vidait l'air que jusqu'à un torr (mm de mercure). Il classifia cependant les types de lueurs obtenues suivant la pression, en anneaux ou stries et conclut qu'il s'agissait d'un quatrième état de la matière, la *matière radiante*,



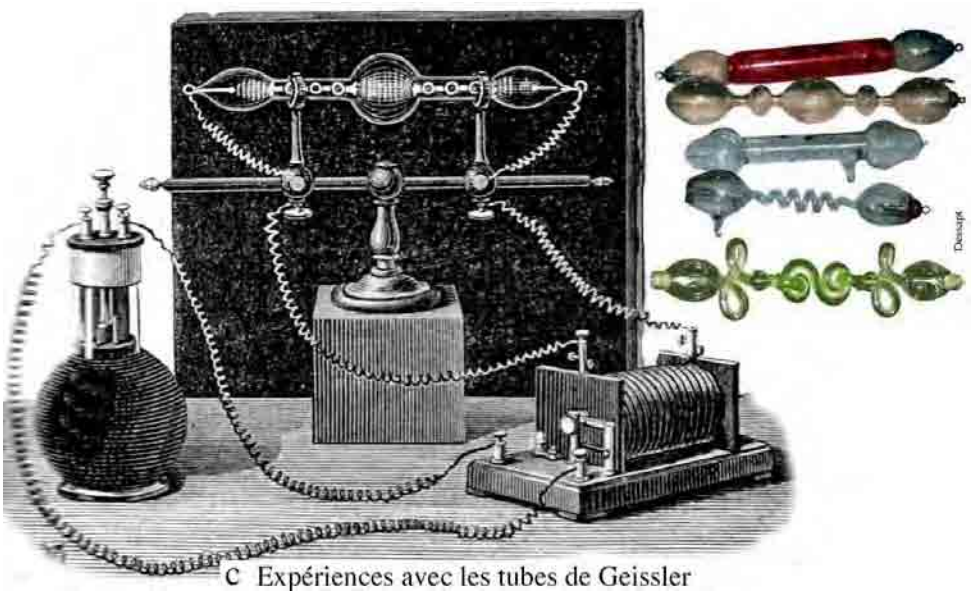
b décharges lumineuses dans l'oeuf électrique

L'anglais **Gassiot**, l'allemand **Plücker** et d'autres reprirent ces recherches après 1850 avec un générateur de haute tension plus performant, la bobine d'induction, dite de Ruhmkorff. La tension de quelques kV, mais sans énergie, était

appliquée aux deux électrodes intérieures d'un « œuf électrique » contenant de l'air, ou autres gaz, à faible pression.

Dans l'expérience n°1 (b), le vide étant à quelques cm de mercure, apparaît une belle figure pourpre, la boule négative s'entourant d'une lumière violacée. Dans l'expérience 2 apparaît une stratification colorée, le vide étant au maximum de la pompe pneumatique, soit 1 mm ou 1 torr.

Ce plasma lumineux, aux multiples variations de formes et de couleurs, intriguait beaucoup. Nous savons seulement depuis le début du siècle suivant qu'il est constitué comme l'arc d'éclairage de deux éléments : d'une part d'électrons, invisibles, éjectés de la cathode ou fugitivement arrachés par collisions avec les atomes de gaz, d'autre part de ces atomes ionisés par perte ou transfert d'un électron à un niveau d'énergie supérieur. En retombant à leur niveau d'énergie normal, ils vont émettre un photon de lumière, dont la couleur dépend de ce saut d'énergie.

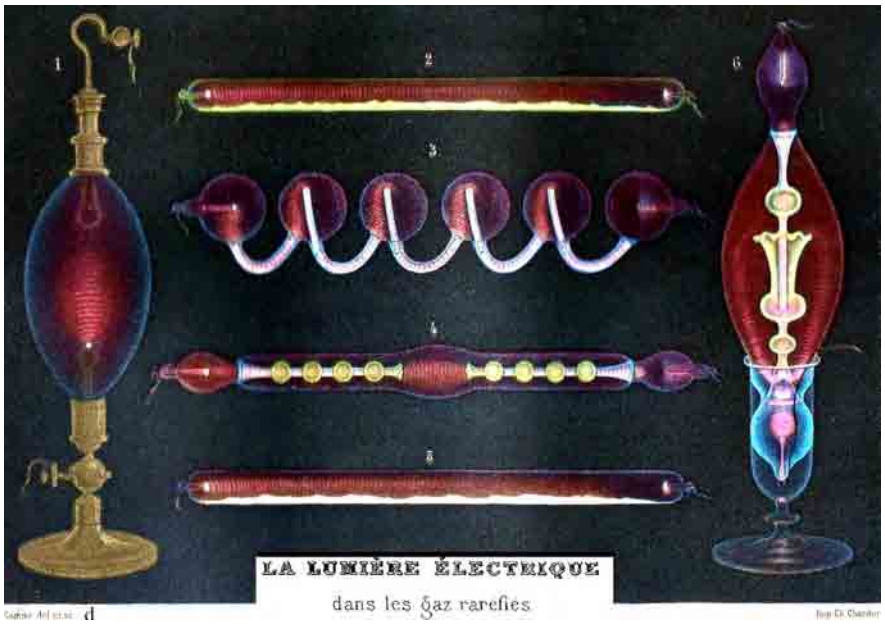


c Expériences avec les tubes de Geissler

L'homme qui marquera une avancée notable dans ce domaine, Heinrich **Geissler**, bénéficiait de l'expérience de son père, souffleur de verre et fabriquant de baromètres à mercure, donc familier de la question du vide.

Il fabriqua vers 1850 une pompe simple et efficace, inspirée par le baromètre. C'était un réservoir de mercure que l'on élevait puis abaissait alternativement, le mercure constituant un piston pratiquement sans fuite. Elle permit aux inventeurs de lampe à incandescence. de progresser, en descendant le vide à un millième de torr.

Il conduisit de multiples expériences avec des tubes aux formes étranges, remplis de divers gaz (c) (1856) ; l'hydrogène s'illuminait en rouge, le gaz carbonique en vert, l'azote en pourpre. Comme Plücker, Geissler obtint aussi la fluorescence de certains verres (1859).



d

Ces phénomènes passionnèrent des physiciens : Stokes, Abria, Warren de la Rue, Spottiswoode qui étudièrent les infinies variantes de ces illuminations.

Une planche en couleurs de 1860 donne une idée de ces expériences (d) :

En 1, une gerbe lumineuse stratifiée dans la vapeur d'alcool – en 2, phosphorescence du sulfure de calcium – en 3, lumière stratifiée dans l'air – en 4, fluorescence du verre d'urane

– en 5, phosphorescence du sulfure de strontium – en 6, fluorescence du verre d'urane et du sulfate de quinine.

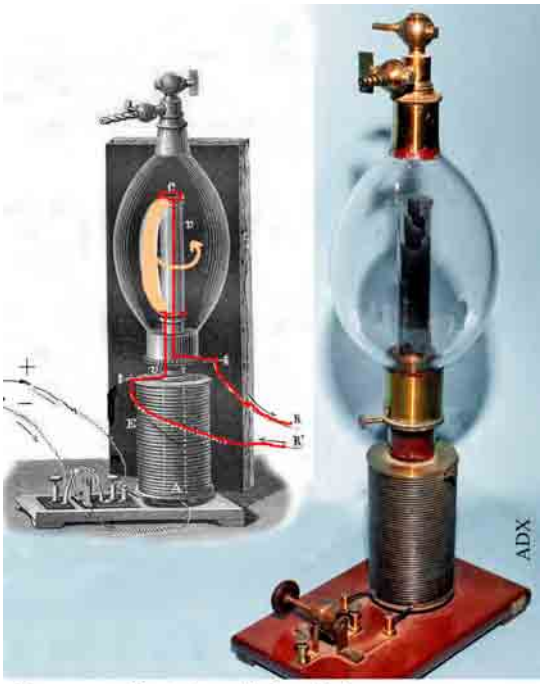
Chacun esquissait une explication théorique de ces phénomènes merveilleux qui n'étaient pas seulement statiques, mais ces lumières étaient parfois animées de mouvements ondulés.

Geissler devint célèbre non seulement par les appareils sophistiqués qu'il fabriquait pour les scientifiques, mais aussi par ses tubes décoratifs que les amateurs et les collectionneurs fabriquent toujours et échangent encore aujourd'hui.

Au cours de ce XIX^e^ siècle, il semble que les **aurores boréales** illuminant souvent le ciel nocturne des pays nordiques furent plus fréquentes et importantes qu'actuellement, d'après les nombreuses relations qui en ont été rapportées. L'une d'elles a même été visible en Europe centrale. La similitude entre ce grandiose phénomène naturel et les lueurs en miniature des tubes de Geissler avait frappé **Auguste de La Rive**. Comme on supposait que le champ magnétique terrestre y jouait un rôle et que plusieurs expérimentateurs avaient remarqué que la colonne lumineuse des tubes était déviée par l'aimant, de la Rive réalisa deux appareils pour essayer de comprendre.

L'un d'eux était un œuf électrique particulier (e).

Il disposa à l'intérieur l'axe magnétique d'un électro-aimant dont la bobine était en dessous, à l'extérieur. L'arc était amorcé par une bobine d'induction entre deux bagues entourant l'axe et se mettait à tourner plus ou moins vite suivant le courant dans la bobine, inversé ; la rotation s'inversait comme le sens du courant par le commutateur rotatif fixé sur la base. C'était donc bien le champ terrestre qui faisait onduler ces aurores. Aujourd'hui on sait que ce sont des particules ionisées émises par le soleil, mais leur comportement sous l'effet du champ terrestre n'est pas encore aujourd'hui bien compris.



e Rotation de la décharge

Georges **Stokes** découvre en 1852 que les rayons ultraviolets provoquent une luminescence de certains corps, particulièrement la fluorite, d'où le nom de *fluorescence*. Edmond **Becquerel** a eu la curiosité de revêtir l'intérieur d'un tube avec des produits alcalino-terreux devenant luminescents avec émission d'une belle lumière diffuse. Il considéra cela comme une simple curiosité, ignorant qu'il avait presque inventé en 1859 la lampe fluorescente du siècle suivant.

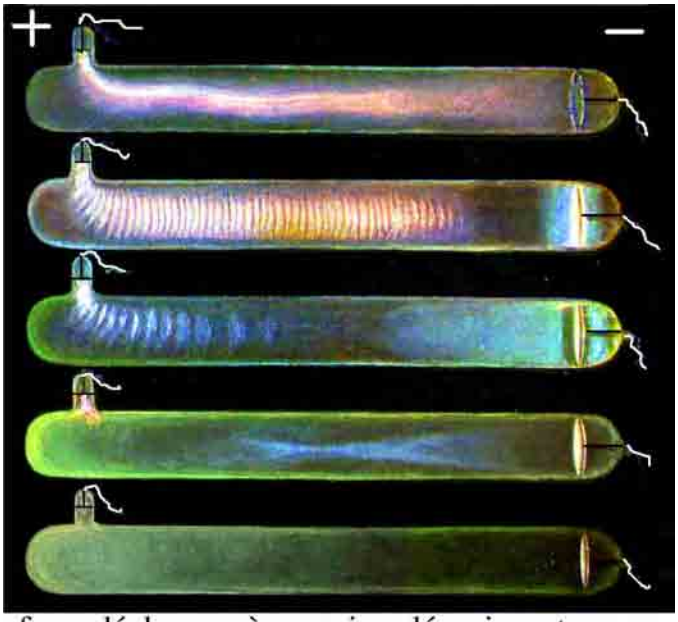
Sprengel inventait en 1865 une pompe à vide plus efficace, ouvrant pour les chercheurs un nouveau champ d'investigations dans le domaine du vide profond. Ce fut l'outil incontournable des inventeurs de la lampe incandescence.

On s'aperçut alors que dans les tubes à air raréfié, les curieux effets lumineux disparaissaient à moins de 1/1000 de torr, il ne subsistait qu'une vague lueur vert-bleue provenant d'une phosphorescence variable des verres suivant leur composition.

Sur la gravure (f), la pression d'air a été progressivement réduite du tube supérieur à celui du bas, dans lequel toute lumière interne a disparu dans un vide presque parfait.

Cela paraissait presque compréhensible puisqu'il n'y avait plus de gaz. Mais ne se passe-t-il plus rien dans cet espace vide ?

La question reçut une réponse positive avec les expériences de William **Crookes** entre 1874 et 1879. Il révélait que des r*ayons cathodiques* traversaient l'espace presque vide, cette *matière radiante* qu'avait supposée Faraday.



f décharges à pression décroissante

Nous savons qu'à ce niveau de vide, les électrons émis par la cathode ne rencontrent plus d'atomes de gaz à ioniser par chocs. Invisibles ils traversent en produisant divers effets. Mais là Crookes, qui le pressentait peut-être, entrouvrait la porte d'un nouveau domaine inconnu, celui de l'*électronique*. N'anticipons pas sur le chapitre V-4 et poursuivons la recherche de cet éclairage par les lampes à décharge.

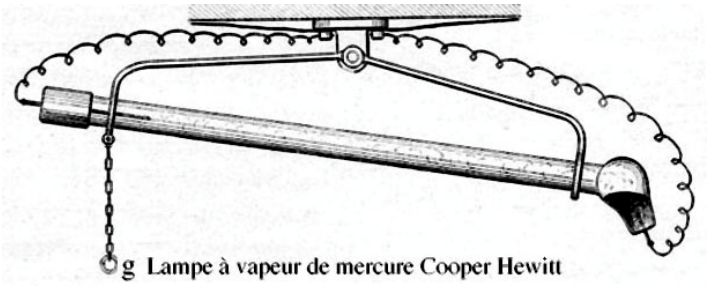
Apparition des lampes à décharge

L'irruption de l'éclairage par lampes à arc et à incandescence à la fin du XIX^e^ relégua un peu dans l'ombre l'intérêt de chercher un autre procédé. Raison pour laquelle le principe de lampes à décharge ne fut suivi de réalisations que lentement, au début du XX^e^.

La lampe à vapeur de mercure

Il apparaissait tentant d'essayer des décharges à travers la vapeur de mercure, le seul métal facile à vaporiser, puisque déjà liquide à température normale. Un Américain, Peter **Cooper Hewitt**, prend en 1901 le brevet d'une lampe où le gaz ionisé, la vapeur de mercure, est contenu dans un long tube à basse pression, de quelques torrs (g). Dans le système primitif, le mercure contenu dans une coupelle à une extrémité du tube est relié à l'alimentation électrique, on le bascule et il coule à l'autre extrémité sur une autre électrode en fer ou charbon. La manœuvre inverse provoque une étincelle vaporisant du mercure, amorçant la décharge permanente.

Après quelques améliorations, dont le basculement automatique par électro-aimant, cette lampe fonctionnant en basse tension continue comme en alternatif, fut commercialisée. Son efficacité lumineuse étant 4 fois supérieure à la lampe à incandescence, mais d'une couleur bleu verdâtre trop chargée en ultraviolet, désagréable, qui réduisait son utilisation à des domaines particuliers comme la photographie, ou plus tard le bronzage artificiel.


g Lampe à vapeur de mercure Cooper Hewitt

Le tube au néon

Entre 1910 et 1915 Georges **Claude**, qui travaillait sur la distillation de l'air pour en séparer ses composants, inverse complètement sa méthode et procède à des condensations successives, ce qui lui permet de recueillir des quantités appréciables de ces gaz dits rares, en très faible quantité dans l'air : argon, krypton, xénon et surtout le néon, le plus connu.

Il essaie d'en remplir des tubes et d'y provoquer une décharge électrique ; une belle lumière rouge apparaît, ainsi que d'autres couleurs en faisant varier la pression et l'adjonction d'autres gaz.

h

Ces *tubes au néon* illuminent toujours les publicités colorées nocturnes (h). Il est facile de leur donner toutes les formes, mais ils nécessitent une tension de quelques milliers de volts, obtenue par des transformateurs placés en hauteur, inaccessibles par sécurité, problème qui interdit de les utiliser à l'intérieur des bâtiments.

La lampe à vapeur de mercure à haute pression

Edmund **Germer** perfectionne cette lampe en 1927 en augmentant la pression interne et en transformant la lumière trop chargée en ultraviolet et pas assez en rouge, par un revêtement interne fluorescent. Il reprenait les anciennes idées de Stokes et de Becquerel.

À partir de 1932, ces lampes améliorées comportaient deux parties. Le tube à décharge en quartz contenant un peu d'argon et quelques gouttes de mercure, avec les deux électrodes principales et des auxiliaires pour amorcer l'allumage. Ce tube était protégé, enfermé dans une ampoule remplie d'azote et dont la paroi interne était revêtue d'un produit fluorescent, au début du fluorure d'yttrium.

L'alimentation électrique nécessitait du 220 V, une inductance à fer pour stabiliser l'arc et un dispositif d'allumage soit par chauffage, soit par l'étincelle d'une surtension provoquée aux bornes de l'inductance. Elle n'a qu'un inconvénient, après une très brève coupure électrique, une fraction de seconde, le rallumage doit attendre le refroidissement, soit 4 minutes d'obscurité.

Ce type de lampe fut progressivement perfectionné avec de nouveaux revêtements internes pour améliorer la qualité colorimétrique de la lumière. Son rendement énergétique était très bon, 6 à 8 fois celui de l'incandescence. Elle est devenue la lampe d'éclairage de tous les espaces extérieurs, halls d'usines, gares, progressivement remplacée par les lampes au sodium.

La lampe à vapeur de sodium

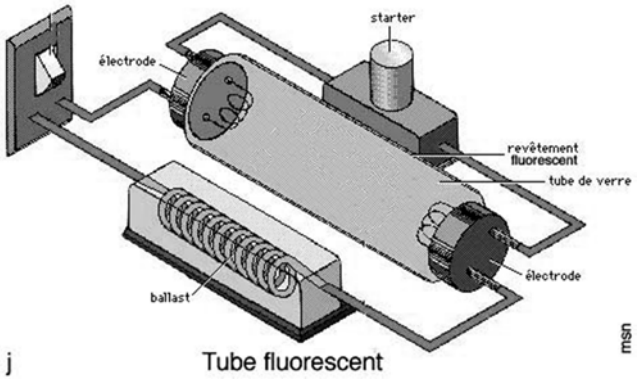
En dehors du mercure, déjà liquide à température normale donc facile à vaporiser, assez bien adapté à la lampe à décharge si ce n'est sa lumière très désagréable, un autre métal apparaissait utilisable, le sodium. Il fond à 97°C et sa vapeur avait les propriétés souhaitées. Une gamme de lampes à fort rendement fut développée à partir de 1932, à basse pression. Mais sa couleur jaune était livide, acceptable seulement pour les éclairages routiers.

Après 1950, on chercha des revêtements intérieurs pour améliorer cette lumière, mais c'est surtout en portant la décharge à haute pression qu'on obtint une couleur jaune dorée, plus riche en rouge. Elle a complètement supplanté la précédente dans l'éclairage routier. C'est actuellement la lampe de plus haut rendement : rapport lumière émise et énergie consommée, 100 à 130 lumen/watt, soit 10 fois celui de l'incandescence actuelle. Sa durée de vie très élevée atteint 12 000 à 20 000 heures.

Le tube fluorescent

Le premier tube fut présenté en 1936 par André **Claude**, neveu de Georges, le père de l'air liquide. C'est un tube à vapeur de mercure à basse pression dont la surface intérieure était revêtue d'un mélange ternaire, silicate de zinc/samarium/calcium. Son alimentation nécessite une réactance en série, le ballast, indispensable pour stabiliser l'arc, d'où la nécessiter de *compenser l'énergie réactive* que consomme le ballast, par des condensateurs, dès que l'on regroupe des dizaines de tubes.(j)

L'allumage nécessite un starter pour vaporiser un peu de mercure et amorcer la décharge. Il n'est donc pas instantané et de plus la lampe n'atteint son plein éclairement que lorsqu'elle est chaude, au bout de quelques minutes.



j Tube fluorescent

La durée de vie est élevée, de l'ordre de 6 à 8000 heures, mais réduite par la fréquence d'allumages.

Le rendement est très bon, 80 lumen/watt, soit 4 fois l'incandescence normale.

Le *tube fluo,* à la vapeur de mercure, souvent dénommé par erreur *tube au néon,* a été encore amélioré après 1950 par un revêtement intérieur donnant une lumière plus agréable. Il représente actuellement plus de 70% de l'éclairage intérieur dans les domaines industriels et tertiaires, mais peu dans les habitations, en raison de sa forme peu adaptée à des luminaires décoratifs et sa lumière diffuse.

La lampe aux halogénures métalliques

On a souvent essayé d'ajouter à la vapeur de mercure d'autres matériaux pour améliorer son rendu couleur sans trop dégrader son efficacité. Général Electric a fabriqué en 1961 des lampes à iodure de sodium. Leur coût plus élevé et la durée de vie faible en ont limité le développement.

La lampe fluocompact

Apparue en 1973, cette lampe n'était qu'une adaptation de forme du tube fluo avec ses deux auxiliaires incontournables, le ballast et le starter. Les progrès et réduction de coût des composants électroniques ont permis de réaliser à partir de 1980 les deux fonctions, allumage et stabilisation de l'arc, avec un circuit électronique peu encombrant, enfermé dans la base de la lampe. Ce fut un net progrès (k). Le rendement est un peu supérieur à celui du tube par suppression du ballast, soit un peu plus de 4 fois celui de l'incandescence. La durée de vie atteint 6000 h, décroissante avec le nombre d'allumages. Le coût est élevé compte tenu d'une fabrication complexe, mais amorti par l'économie de consommation en 1000 heures environ (1).

k Lampe fluocompact

Mais si cette lampe est un progrès vis-à-vis du tube par l'encombrement et la douille de fixation, elle en garde l'inconvénient relatif d'une lumière diffuse. Elle ne peut remplacer les spots à lumière directive et petites lampes halogènes plus décoratives, très utilisées dans le secteur résidentiel, le plus concerné par cet éclairage ; le secteur tertiaire, bureaux et commerces, utilisant en majorité et depuis longtemps le tube fluorescent.

La LED

Ajoutons la dernière apparue dans les premières années 2000, la diode électroluminescente à semi-conducteur LED, pleine de promesses. Elle cumule nombre d'avantages, contre peu d'inconvénients : très bon rendement énergétique, 20 à 200 lumens/watt, tension faible de quelques volts, très grande longévité, très bonne solidité mécanique, presque pas d'échauffement, montage facile sur circuit imprimé, prix un peu élevé mais réduit à terme.

Son principal inconvénient étant un rendu des couleurs encore difficile à optimiser. Il est un peu trop tôt pour en donner les caractéristiques en amélioration continue.

Elle matérialise le rêve de Lodge, disciple de Maxwell, qui cherchait, en 1887, à générer les ondes prédites par Maxwell, et y parvint , mais dans un cas particulier. Il fut doublé par Hertz dont il ignorait les travaux. Il espérait faire même mieux et produire par des moyens électriques des ondes de fréquence 10 000 fois plus élevée, les ondes lumineuses. Le rendement aurait été bien supérieur que celui des ondes émises par effet thermique dans les lampes à incandescence, ou effet atomique dans la lampe à décharge. (V-3).

La LED y parvient, mais encore assez loin du rendement théorique

Compléments

1- lampe fluocompact. Deux avantages souvent évoqués par la publicité doivent être relativisés, l'économie d'énergie et l'écologie.

Dans le secteur résidentiel représentant 41% du total de la consommation d'électricité française, les 29 millions d'abonnés consomment en moyenne 4600 kWh par an. Cette consommation se répartit ainsi : en comptant pour 1 la consommation de l'éclairage, celle de la cuisine électrique éventuelle est aussi de 1, le poste « divers » est à 2, l'eau chaude à 2, les appareils ménagers à 3, et le chauffage électrique à 4, s'il est utilisé.

La consommation due à l'éclairage domestique se situe ainsi en moyenne à 10% au plus de la consommation d'un foyer, soit 4,1% de la consommation totale en France. En la réduisant de moitié, l'économie à l'échelon national serait de 2%, à comparer avec l'accroissement moyen annuel de 1 à 1,5%, donc économie minime. Surtout que sur un poste beaucoup plus dispendieux en énergie que l'éclairage, les lave-vaisselle et linge, une modique réduction facile de 15% du nombre des lavages apporterait la même économie d'électricité, sans compter la diminution d'eau propre et usée à traiter.

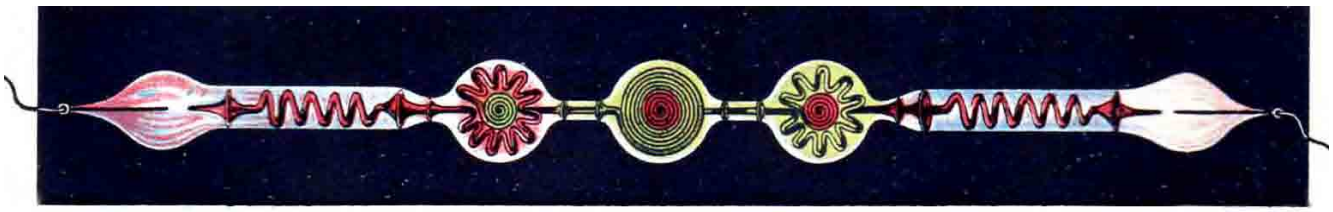
Ces nouvelles lampes font travailler les pays asiatiques qui fabriquent pour Osram et Philips, dont le chiffre d'affaires en lampes d'éclairage va être multiplié par deux ou trois, tout en fermant des usines européennes.

De plus ces sociétés ont obtenu que la vente des lampes classiques soit interdite par la loi. Étrange précaution, inutile si comme on l'annonce, le consommateur, attentif au coût est économiquement gagnant.

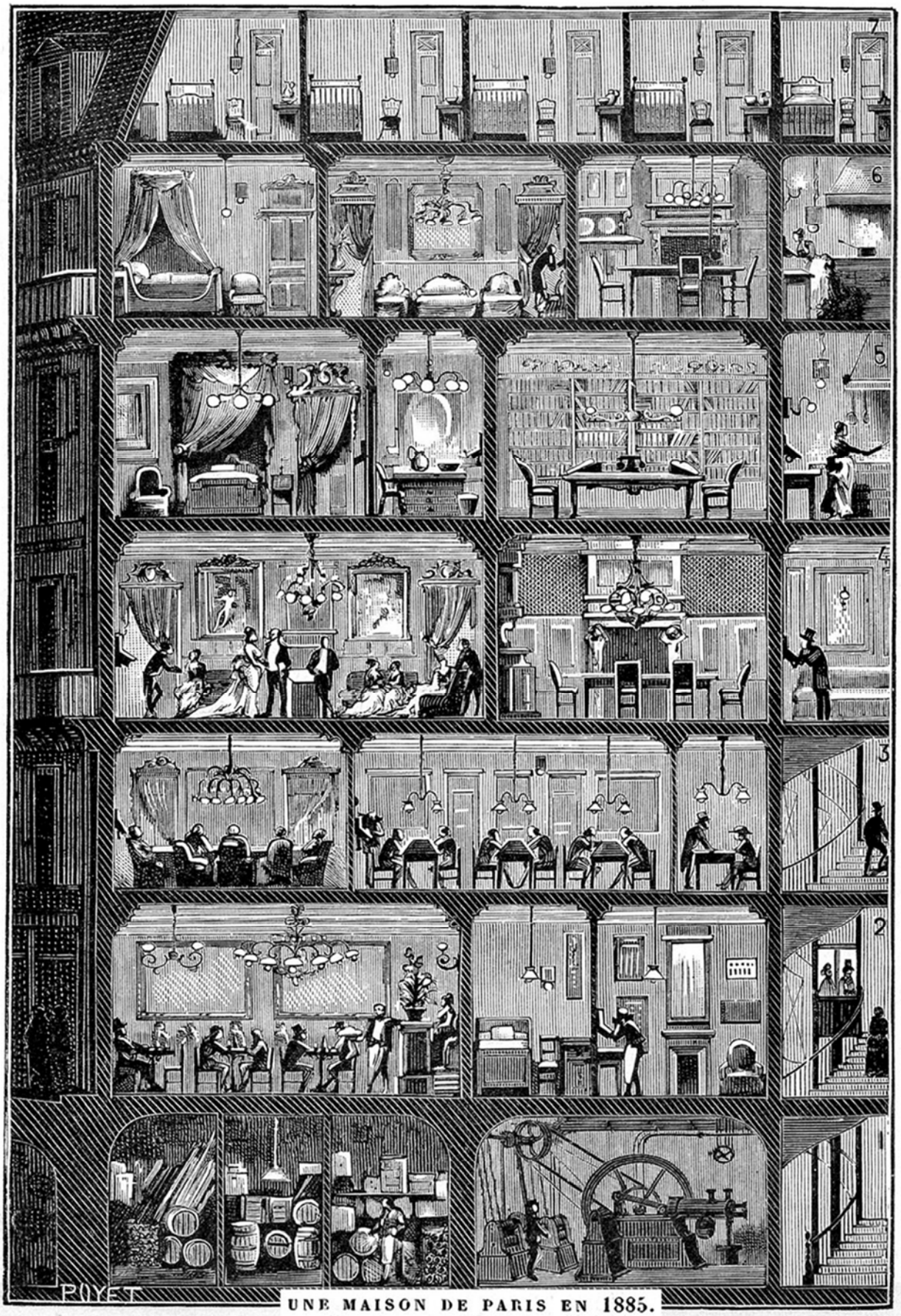
Une économie bien plus importante serait obtenue par l'extinction totale ou partielle de la moitié des lampadaires éclairant inutilement de 1h du matin à 7h, les centaines de voies périurbaines où ne circule aucun piéton. Mais l'énergie électrique de nuit ne vaut pas cher économiquement

La lampe fluocompact pose un autre problème écologique identique à celui des tubes fluos utilisés par centaines de millions depuis 50 ans, où les jeter ? Elle contient en effet quelques mg de mercure, un revêtement intérieur en produits toxiques, plus les composants électroniques. Pour prévenir cette pollution, les fabricants ont créé un organisme de récupération des lampes, *Recyclum*, financé par une taxe relativement élevée de 0,3 €, incluse dans le prix. Mais combien de lampes y seront-elles déposées, alors que le taux de piles et petits accus non recyclés, allant à l'incinérateur serait de 90 % ?

Cette lampe ferait-elle partie des fausses bonnes solutions énergétiques, aux objectifs apparemment vertueux ? Un bilan annuel serait à établir à partir de 2010. De combien diminue la consommation globale en France, sachant que son accroissement moyen est de1,4% ?



Tube à vide rendu fluorescent par l'Urane et le Sulfate de Quinine GORDON. Électricité.



UNE MAISON DE PARIS EN 1885.

LES MOTEURS, L'ÉCLAIRAGE, LES TÉLÉPHONES, LES AVERTISSEURS, LES ALLUMOIRS ET LES SONNERIES.

4 - Exposition internationale de l’électricité

Paris - 1881

1880 - L’électricité a 80 ans, elle quitte les académies, laboratoires des physiciens et ateliers artisanaux pour faire irruption dans le quotidien industriel et domestique.

– La première grande application mature, le télégraphe, transporte l’information dans le monde entier avec 650 000 km de lignes et 80 000 km de câbles sous-marins.

– La précédente décennie a vu se finaliser 40 ans de recherches sur un générateur-moteur électromécanique industriel, 1000 fois plus puissant que la pile.

– Le tout récent téléphone (1876) transporte déjà à 2 km le son et la voix, l’opéra avec le théâtrophone, l’image fixe.

– L’éclairage par la lampe à arc, complété par la toute nouvelle lampe à incandescence (1880), annihile l’ancestrale fatalité de l’obscurité nocturne.

– Une perspective ambitieuse se dessine, l’électricité doit pouvoir transporter la *force*, l’énergie, dans de simples fils, bien plus facilement et plus vite que le chemin de fer transporte l’énergie du charbon sur des rails. *Des découvertes importantes et inattendues ont récemment appelé l’attention publique sur tout ce qui concerne l’électricité ; en même temps l’industrie, s’emparant de ces conquêtes de la science, a depuis quelques années multiplié leurs applications. Aujourd’hui, aucune science ne semble devoir, plus que la science électrique, réaliser de rapides progrès, résoudre des problèmes intéressant la vie économique des nations et enfin rendre à toutes nos relations d’inappréciables services.*

Nous ajoutons que les savants et les industriels cherchent, dans tous les pays du monde, à perfectionner les moyens de produire et d’utiliser cette force nouvelle de l’électricité. Il y avait grand intérêt à préciser l’état de la science et de ses applications, à rapprocher et comparer les procédés de recherches, afin d’imprimer aux efforts accomplis de toute parts une direction qui puisse assurer et féconder leur succès.

Tels étaient les objectifs proposés dans leur rapport d’octobre 1880 par les organisateurs de cette première exposition internationale, uniquement consacrée à l’électricité. Le comité d’organisation comprenant Gaston Berger, Antoine Breguet, et Hippolyte Fontaine était présidé par le ministre des Postes et Télégraphes, A. Cochery, marquant ainsi que la grande application de l’électricité dans la vie publique était le télégraphe. En effet, les professionnels de l’électricité étaient les ingénieurs du télégraphe.

Un autre objectif, non exprimé, était de montrer au monde que la France était un grand pays scientifique et industriel, pour faire oublier la cuisante défaite militaire de 1870 contre l’Allemagne, récemment réunifiée.

L'exposition

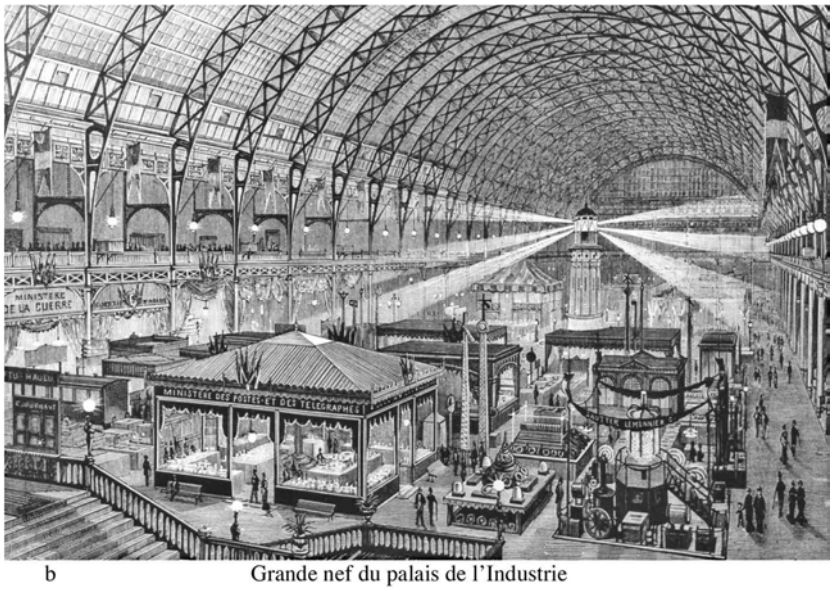
Elle fut inaugurée, en retard, le 10 août 1881, par un président pressé, Jules Grévy, sans grande pompe ni cortège imposant, et presque à la vitesse de l'électricité, juste une heure. C'était trop rapide pour se rendre compte du travail des 1764 exposants : 937 français, 208 belges, 148 allemands, 122 anglais, 81 italiens, 72 américains, 38 russes, 37 autrichiens, 23 suédois, 23 espagnols, 21 suisses, 19 norvégiens, 18 hollandais, 10 hongrois, 5 danois et 2 japonais.

Le Palais de l'Industrie (a) était situé à l'emplacement actuel du Grand et du Petit Palais. Au-dessus de l'entrée, quatre projecteurs éclairaient les Champs-Élysées de la Concorde à l'Arc de Triomphe. Construit pour la première exposition universelle française en 1855 (1), sa grande verrière lui donnait assez de lumière naturelle, car l'électricité ne commença à briller le soir que le 26 août en raison des difficultés d'installation des moteurs et générateurs électriques pour une puissance très élevée, jamais atteinte. C'était la première grande exposition éclairée par l'électricité

a Palais de l'Industrie - exposition de l'Electricité 1881

À l'entrée dans la grande nef, le coup d'œil était féerique le soir, un phare projetait l'éclat de sa lanterne tournante, au centre d'un petit bassin.(b) Dans la moitié droite étaient rassemblé les exposants français, le stand le mieux placé, celui du ministère des Postes et Télégraphes présentant des appareils anciens, à côté du dernier modèle Baudot. La moitié gauche était réservée aux stands étrangers.

Sur le coté de la nef parallèle à la Seine avaient été regroupées les machines génératrices, dont beaucoup fonctionnaient pour alimenter les centaines de lampes à arc ou à incandescence dans les stands, passages, salles et escaliers. Pour les exposants français un syndicat dirigé par Fontaine regroupait les exposants ayant besoin d'électricité pour leurs éclairages, assurait leur alimentation et celle de tous les espaces communs. Il se rémunérait en prélevant 0,5 F après 8 h du soir sur le billet à 1,5 F.



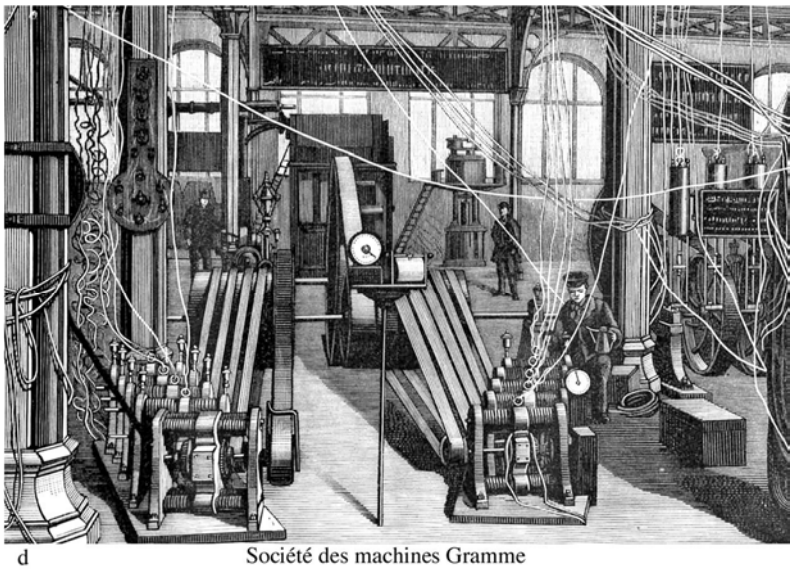
b Grande nef du palais de l'Industrie

La plupart des génératrices étaient entraînées par des moteurs à vapeur de 100 ch et plus, quelques-unes par des moteurs à gaz de 10 à 50 ch.

La puissance totale atteignait 1400 ch. Un équipement aussi puissant et varié, jamais réuni, permit simultanément des essais et comparaisons.

On constatait ainsi que les moteurs à vapeur au-dessus de 100 ch consommaient 1 kg de charbon par cheval/heure, que l'on obtenait 10 à 15 fois plus de lumière électrique à partir d'un moteur à gaz entraînant un générateur que de brûler ce gaz dans des becs. (2)

Les différents modèles de machine Gramme étaient présentés sur le stand de la société, mais aussi sur ceux des associés, Jablochkoff, Breguet, Mignon et Rouart, Ducommun, Sautter et Lemonnier, Jaspar de Liège, Hijo de Barcelone. (d)



d Société des machines Gramme

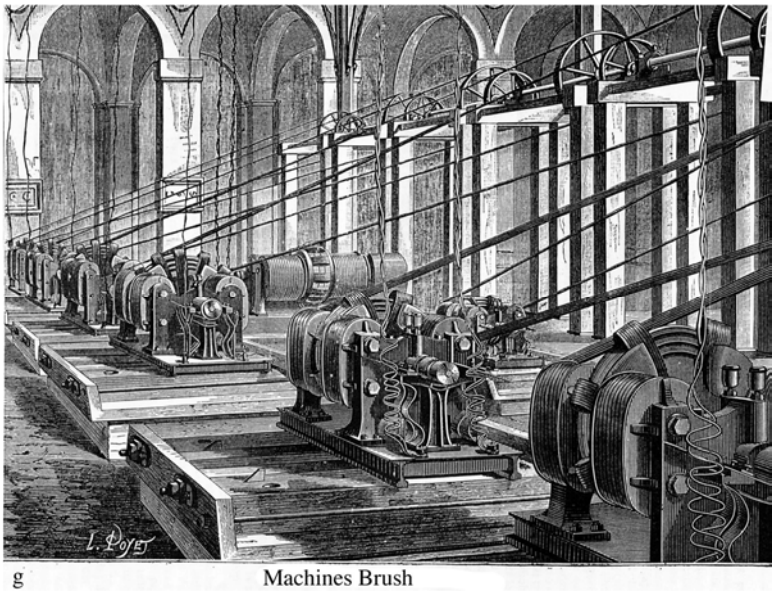
L'ancienne machine de l'Alliance pour l'éclairage des phares figurait à côté de sa version récente de Méritens. Lontin présentait une machine avec son système d'éclairage à arc.

Les étrangers présentaient chacun une machine alimentant leur propre système d'éclairage à arc ou incandescence: Pour l'Allemagne Siemens, pour l'Angleterre Crompton avec la lampe Swan, pour les États-Unis, Brush (g), Edison, Maxim et Weston. Une installation remarquée était celle de Brush, avec 14 machines en fonctionnement sous 800 volts, capables d'alimenter en série, 6, 16 ou 40 lampes à arc.

Les salles de la galerie

Sur le côté Ouest, le grand escalier donnait accès aux 25 salles de la galerie.

Chacune était éclairée par un système d'éclairage particulier, la majorité à arc. Certaines avec l'un des quatre nouveaux éclairages par lampe à incandescence, Swan, Edison, Maxim et Lane Fox. Une centaine de ces lampes éclairaient les couloirs et espaces communs.



g Machines Brush

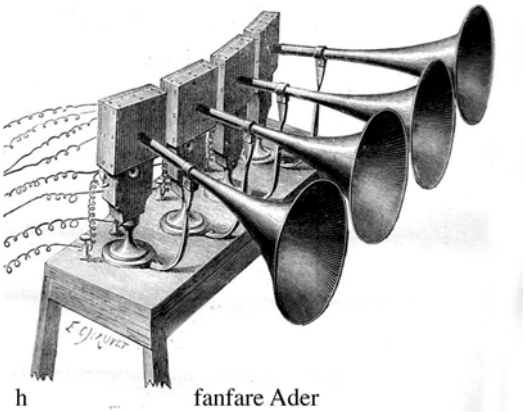
Plusieurs salles représentaient les différentes pièces d'un appartement parisien, avec le confort moderne qu'allaient apporter tous les nouveaux appareils électriques : lustres, torchères, lampes de table, sonneries et tableau d'appel pour les domestiques.

D'autres salles étaient consacrées au musée rétrospectif de l'électricité, l'évolution de cette jeune science, bientôt centenaire, se racontait par l'objet : une grande machine électrostatique hollandaise de Van Marum, les différents appareils de Volta, la table d'Ampère, la machine de Pixii.

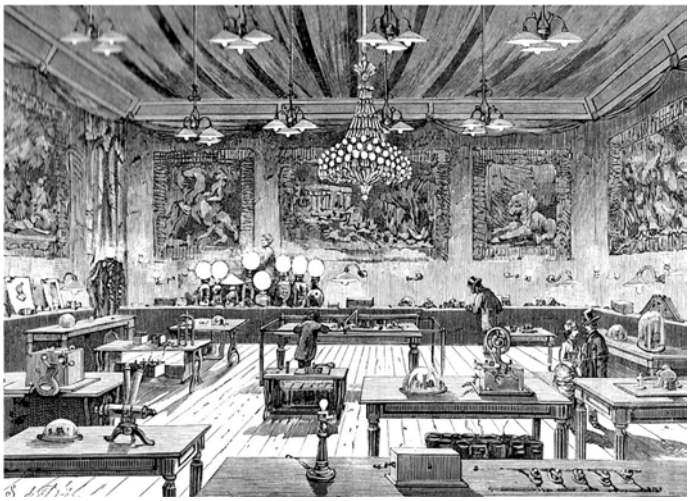
Au stand italien était présentée aussi la petite machine de Pacinotti, ignorée jusque-là, sinon des visiteurs de l'exposition de Vienne ou elle avait été présentée. Il en a été longuement question au sujet de l'invention des premiers générateurs Gramme (II-3). Quelques italiens considéraient que Gramme l'avait copié, ce qu'amplifièrent des concurrents jaloux, Méritens en particulier.

Les revues techniques y consacrèrent des articles et les industriels belges et français proposèrent pour satisfaire l'amour-propre italien, de classer Pacinotti parmi les inventeurs dans les prix décernés à la fin de l'expo.

Dans la salle de théâtre richement illuminée, d'étranges appareils acoustiques, la *fanfare Ader*, (h) diffusait le soir l'orchestre des célèbres trompettes d'Aïda depuis l'Opéra Comique. De même deux salles étaient consacrées à l'audition par le public de la retransmission des pièces depuis l'Opéra, le *théatrophone*, première application du tout nouveau téléphone. La société Edison avait réservé deux salles pour présenter d'abord son système d'éclairage ainsi que les multiples appareils inventés par le sorcier de Menlo-Park : télégraphe quadruplex, télégraphe autographique, téléphone à charbon, phonographe, photomètre, webermètre (mesure de l'intensité en weber), machine magnétique à trier le minerai (j).



h fanfare Ader



j Salle Edison

Un jeune Anglais de 22 ans, St George Lane Fox Pitt, entreprenait lui aussi en 1878 la construction d'une lampe à incandescence et déposait plusieurs brevets. Comme pour la lampe précédente, on dispose de peu d'informations sur sa conception. (10)

Ce n'était pas une banale présentation de matériels, mais un spectacle agrémenté de tableaux illuminés des meilleurs artistes, des lustres où les ampoules brillaient entre les pendeloques en cristal. Les salles Edison devenaient un point de rencontre pour la bonne société, où des techniciens donnaient des explications et faisaient des démonstrations étonnantes. Ils mettaient un mouchoir sur une lampe, il ne flambait pas comme sur le gaz, ils cassaient la lampe, le mouchoir n'était même pas noirci, la lampe s'éteignait et c'était tout. La lumière Edison était vraiment magique.

À l'extrémité de la galerie s'ouvrait la vaste salle du Congrès, où se réunirent en septembre les représentants de tous les pays, pour étudier les nouveaux problèmes posés par l'électricité et le développement des applications.

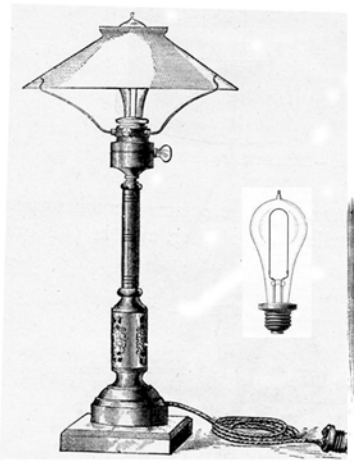
L'éclairage électrique

Les lampes à arc n'avaient commencé à éclairer les rues que depuis cinq ans et la lampe à incandescence, presque inconnue un an plus tôt, allait permettre la *division de la lumière*, c'est-à-dire une source lumineuse moins éblouissante que la lampe à arc et plus pratique dans les intérieurs.

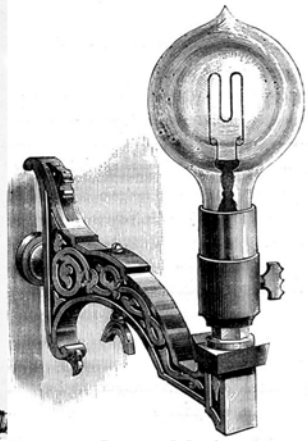
Deux systèmes de lampe à arc se concurrençaient : les lampes à régulateurs, efficaces, mais assez complexes et les *bougies*, sans régulateur, système initié par Jablochkoff et suivi par différentes variantes, lampe Soleil, systèmes Jamin, Reynier, Werdermann, Jaspar.

La récente lampe à incandescence était présentée par quatre constructeurs, deux anglais et deux américains :

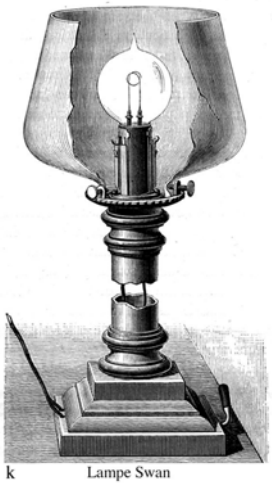
Swan (k), Edison (l), Maxim (m) et Lane Fox (n). Dans cette compétition, on remarquait l'absence des constructeurs allemands et français.



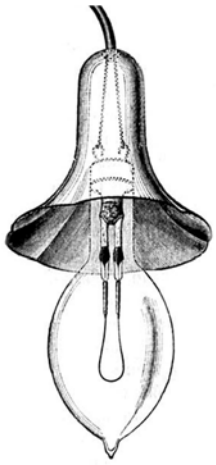
l Lampe Edison



m Lampe Maxim



k Lampe Swan



n Lampe-Lane Fox

Ces quatre lampes ne se différentiaient que par des détails de fabrication, les culots de raccordements et la constitution du filament en carbone, mais aucune ne présentait de nette supériorité. Elles étaient prévues pour des puissances de 16 et 32 bougies, des tensions de 100 volts, ou la moitié en mettant deux lampes en série.

Le tableau des essais comparatifs (o) ne montre pas de différences significatives. On remarque sur ce document qu'à l'exposition de Munich, un an plus tard, la lampe Lane Fox ne figurait plus et d'autres apparaissaient, celles des Allemands Siemens et Müller et de l'Italien Cruto.

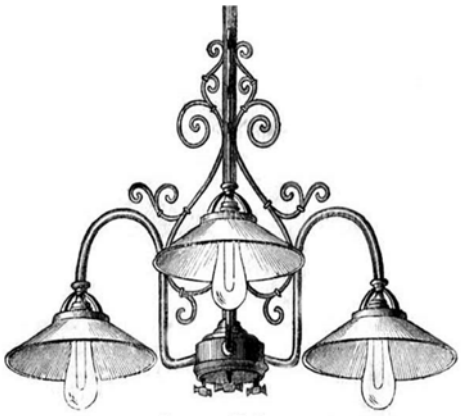
O

In the following schedule the results of measurements with respect to glow lamps, received at the Exhibitions at Paris and Munich, have been tabulated :

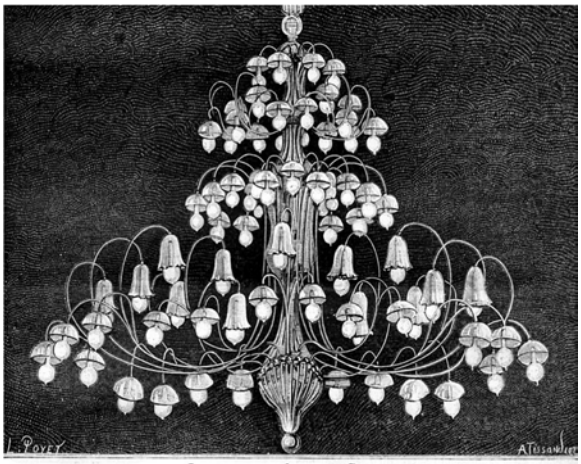
Lamp.	Nominal Candles.	Light Intensity, Standard Candles.	Resistance (Warm) Ohms.	Difference of Potential in Volts.	Current in Amperes.	Electric Energy in Volt-Amperes.	Electric Energy in H. P.	Light Intensity per H. P.	No. of Lamps per H.P.
RESULTS GIVEN BY THE EXHIBITION COMMISSION AT PARIS.									
Edison, A ...	16	15·38	137·4	89·11	0·6510	57·98	0·0788	196·4	12·28
,, C ...	32	31·11	130·03	98·39	0·7585	74·62	0·0941	307·25	9·60
Swan, A ...	16	16·61	32·78	47·30	1·471	69·24	0·0945	177·92	11·12
,, B ...	32	33·21	31·75	54·21	1·758	94·88	0·1059	262·49	8·20
Lane-Fox, A ...	16	16·36	27·40	43·63	1·593	69·53	0·0125	173·58	10·85
,, B ...	32	32·71	26·59	48·22	1·815	87·65	0·1289	276·89	8·65
Maxim, A ...	16	15·96	41·11	56·49	1·380	70·85	0·1191	151·27	9·45
,, B ...	32	31·93	39·60	62·27	1·578	98·41	0·1337	239·41	7·48
RESULTS GIVEN BY THE MUNICH COMMITTEE.									
Edison, B ...	8	11·69	67·68	55·78	0·825	46·02	0·0625	186·90	23·36
,, A ...	16	15·32	139·60	103·05	0·755	77·80	0·1057	144·88	9·05
Maxim ...	28	13·34	47·01	65·07	1·384	90·06	0·1224	108·98	3·89
Swan, A ...	10	10·95	31·91	38·38	1·222	46·90	0·0637	171·78	17·18
,, B ...	40	37·17	87·03	118·02	1·282	151·30	0·2056	180·75	4·58
Siemens ...	16	14·90	104·72	95·74	0·915	87·60	0·1191	125·14	7·82
Müller, A ...	20	18·43	58·62	74·94	1·263	93·51	0·1271	145·01	7·26
,, B ...	50	43·08	59·52	105·22	1·779	187·19	0·2544	169·33	3·39
,, C ...	100	102·35	65·41	155·15	2·367	367·24	0·4991	205·05	2·05
Cruto ...	10	8·47	8·16	22·15	2·715	60·14	0·0817	103·58	10·36

La durée de vie des lampes, en général de 800 à 1000 heures, est rarement mentionnée. Elle était très influencée par le courant traversant, donc la tension.

Chacun des trois principaux fabricants de lampes avait réservé une ou deux salles sur la galerie, où se pressaient public et spécialistes.



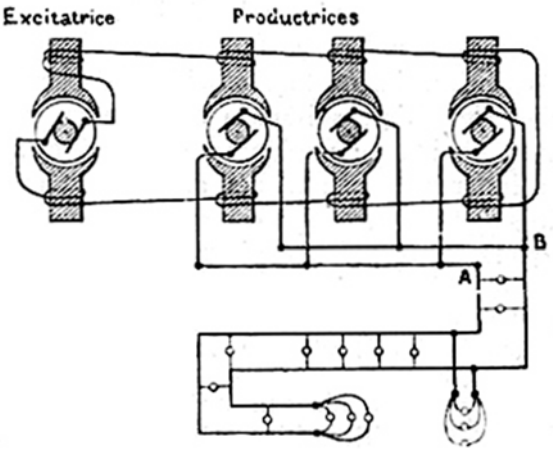
s Lustre Edison



q Lustre avec lampes Swan

La ***Swan*** *Electric Light Co*. présentait sa lampe et divers accessoires, appliques et lustres, (q) mais pas de machine génératrice ; elle était fournie par Crompton.

Edison et ses diverses sociétés américaines et européennes occupait deux salles où figuraient les multiples accessoires d'installation (s) ainsi que le projet en gestation d'éclairage de tout un quartier de Manhattan. Les génératrices du premier type Z pour 70 lampes était en fonctionnement au niveau inférieur. Pour ajuster la puissance instantanée de la machine au nombre de lampes en service, il fallait concevoir un régulateur. Celui présenté par Edison n'était pas encore automatique, seulement qu'un rhéostat manoeuvré manuellement.



W Montage des machines Maxim

Foyer de l'Opéra de Paris

X éclairé par les lampes Maxim, Edison et lampes Soleil·

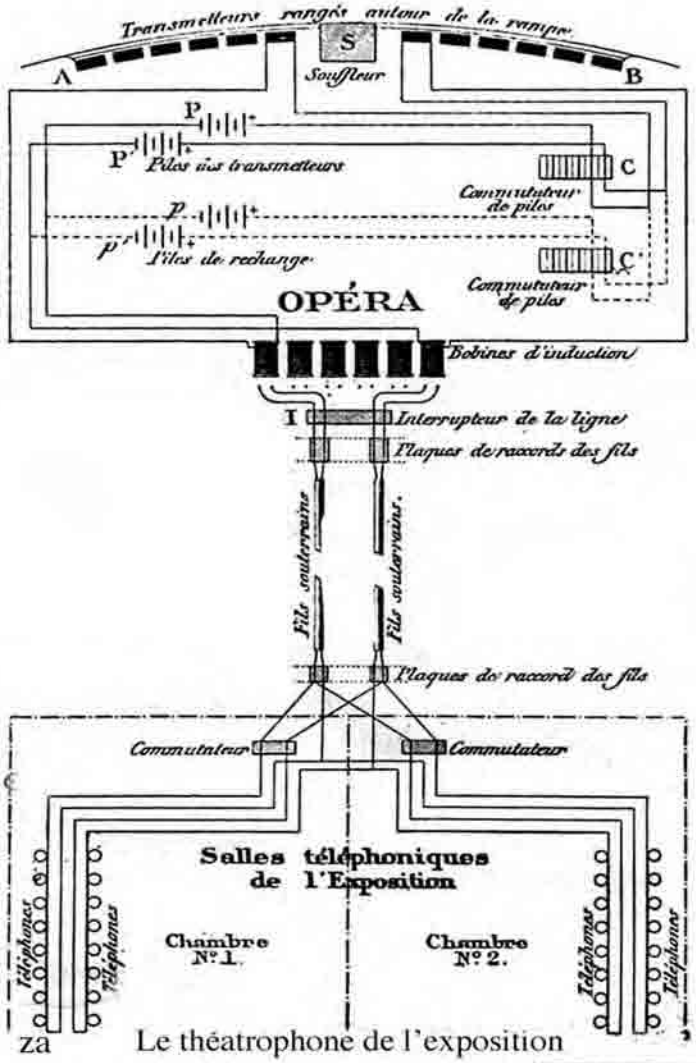
Maxim exposait son système d'éclairage par ses deux sociétés, l'*United States Electric lighting Co* et *The British Electric Light Co.* Sa machine avait un régulateur automatique intégré permettant de faire fonctionner plusieurs machi-nes en parallèle (w) sur un nombre quelconque de lampes.

Lane Fox, qui n'avait pu louer une salle, avait néanmoins équipé avec ses lampes le lustre d'une salle d'auditions téléphoniques.

Pour fêter la clôture de l'exposition une brillante illumination intérieure de l'Opéra fut organisée le 15 octobre, avec les différents systèmes, arc et incandescence. Il y eu quelques retards, des difficultés pour installer moteurs et générateurs à proximité.

Sauf pour l'éclairage à arc du système Brush, dont les 38 lampes groupées en série s'allumèrent le soir prévu, alimentées depuis leur générateur installé à 2 Km, au Palais de l'Industrie, mais sous 800 volts, sa spécificité. C'était en lui-même une distance record, jamais réalisée

Après trois jours, le système à incandescence Maxim fonctionna, peu après les deux autres, Edison et Swan. Ce fut une apothéose, des certaines de lampes sur des lustres, mais pour le seul public aisé de l'Opéra (x).



za Le théatrophone de l'exposition

Le *théâtrophone*, retransmission téléphonique de l'Opéra

Le téléphone, tout récent, cherchait son domaine d'utilisation. On n'était pas encore aux communications d'un abonné à un autre par deux fils reliés par standard. Dès l'apparition du microphone à charbon (Berliner, Hugues, Edison) non protégés par un brevet en Europe nombre de constructeurs proposèrent des solutions.

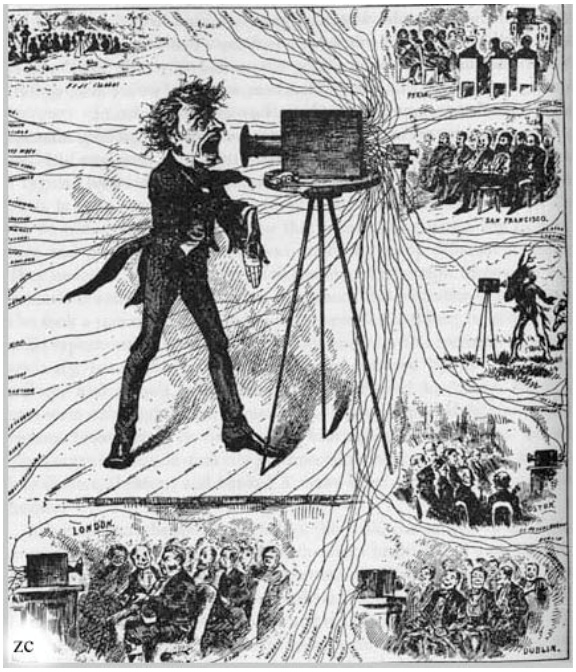
L'un des plus innovant fut l'ingénieur français Clément Ader. Pour l'exposition il conçut tout un système capable de transmettre par téléphone les séances de l'Opéra jusqu'au Palais de l'industrie, où le public pouvait les écouter sur un poste individuel.

A l'Opéra, sur le devant de la scène étaient disposés de chaque coté du souffleur six tranmetteurs, des micros à charbon permettant une transmission en stéréophonie, jusque dans les deux salles d'audition de l'exposition, éclairées par les lampes Lane Fox (z).

Dans chaque salle, capitonnée avec des tapis pour étouffer les bruits, étaient disposé 20 postes d'écoute avec chacun deux écouteurs, permettant d'entendre musique et chœurs *en relief* (stéréophonie), de Faust, La Favorite ou Les Huguenots (za). Chaque salle était alternativement reliée aux micros pendant quatre minutes seulement, permettant son évacuation et la réinstallation de 20 nouveaux auditeurs enthousiastes, qui faisaient la queue pendant une heure certains soirs. Après l'exposition, des théâtrophones furent installé dans des hôtels et cafés où les amateurs auditionnaient les soirées théâtrales 5 minutes pour quelques centimes .

z Audition téléphonique de l'Opéra à l'exposition

Une gravure du *Daily Graphic* préfigurait la future radio en présentant un chanteur, presque un *rockeur*, écouté partout dans le monde, à Londres, Pékin, San Francisco, Dublin, St Petersbourg, reliés depuis le studio d'émission par des centaines de fils téléphoniques (zc). Cette première application du téléphone n'était pas individuelle, mais collective.



zc

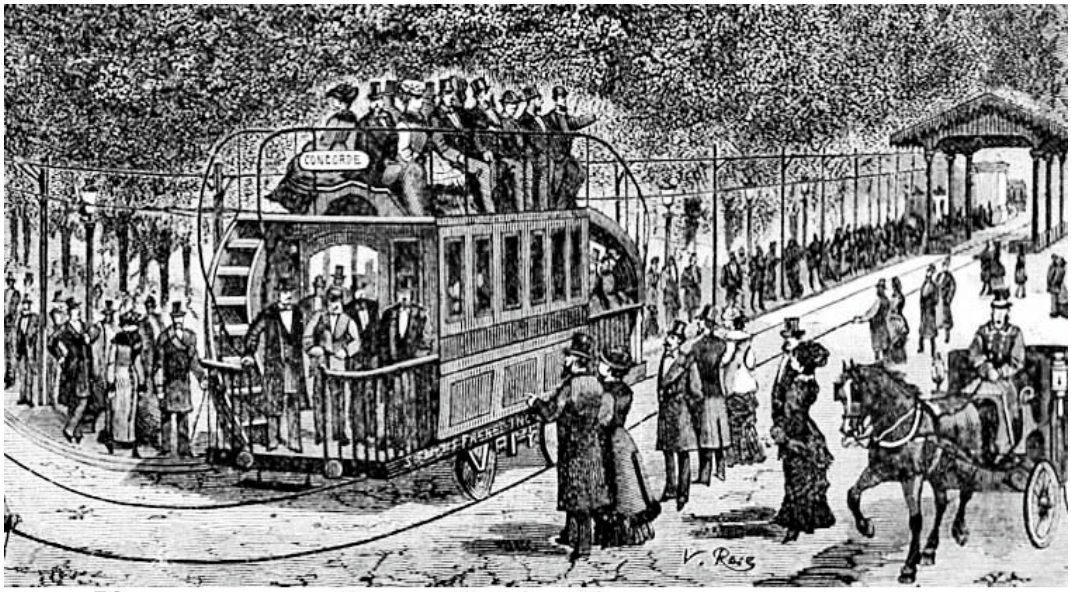
Locomotion électrique

La force des moteurs électriques allait permettre de trouver un nouveau moyen de locomotion terrestre, complément du chemin de fer à vapeur. Dans plusieurs pays, apparaissaient de petites locomotives électriques. En France, Clément Félix, directeur de la sucrerie de Sermaize, présentait à l'exposition une telle machine alimentée par accumulateurs.

ze Exposition de Berlin- 1879

En Allemagne, Siemens avait fait fonctionner en 1879 un petit train pour les visiteurs de l'exposition de Berlin sur 300 m (ze). Il roulait à 7 km/h, alimenté en 150 volts par des frotteurs au sol. Début 1881, ce pionnier mettait en exploitation à Lichterfelde le premier tramway électrique du monde ; il transportait 20 personnes à la vitesse maximum de 40 km/h, sur une distance de 2,5 km.

Une voiture de ce tramway était présentée dans l'exposition. Une autre voiture, un *car* à impériale de 50 places, roulait sur 500 m depuis la place de la Concorde, à côté des chevaux de Marly, et pénétrait dans le palais par l'entrée Est.

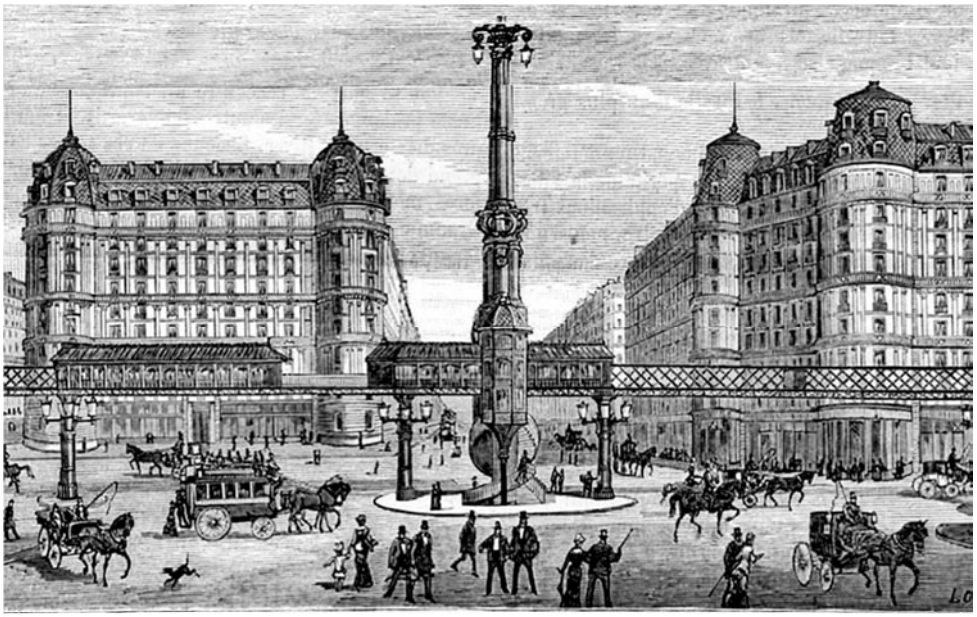


zg Tramway électrique Siemens

L'alimentation électrique n'avait pas pu être conçue, sur cette voie provisoire, au sol par les rails. On installa donc une ligne aérienne sur laquelle des frotteurs captaient le courant pour une puissance de 7 ch sous 150 volts (zg).

Il fonctionna 3 mois, effectuant 4000 voyages pour 84 000 voyageurs, à 17 km/h, vitesse d'un cheval au trot, L'attraction fut aussi spectaculaire que le théâtrophone, C'était la démonstration que les chevaux électriques pouvaient tirer les tramways urbains bien mieux que les traditionnels chevaux à crottin, sans leurs inconvénients.

Un plus vaste projet, l'ancêtre du métro, était présenté dans l'exposition sous forme de maquette et dessin (3) par l'ingénieur J. Chrétien. Ce chemin de fer à double voie devait être installé sur les boulevards, de la Madeleine à la Bastille, soit 4,5 km. Les voies étaient en hauteur sur un viaduc, portées par une rangée de colonnes métalliques (zh). Douze stations accessibles par escaliers étaient prévues.



Chemin de fer électrique aérien de Paris - Vue d'une gare de voyageurs

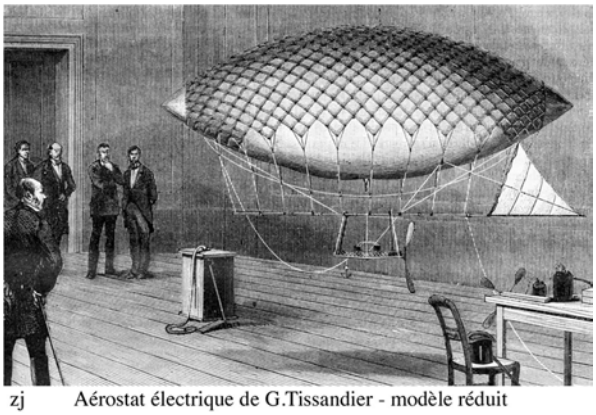
Il pouvait transporter dans chaque sens 100 personnes à la vitesse de 400 m par min, soit celle d'un bon cheval au trop, le double de la vitesse des omnibus.

Le projet soigneusement étudié coûterait 8 à 10 millions de francs ; avec un prix du billet de 10 centimes, qui permettrait de verser à la ville une redevance d'un million.

Vingt ans plus tard démarraient les travaux du métro parisien électrique, mais souterrain, comme celui de Londres. Ce dernier, à vapeur depuis 1863, fut électrifié en 1890.

D'une façon plus modeste, l'électricité promettait aussi la propulsion des navires. L'ingénieux inventeur G. Trouvé, le bien nommé, faisait tourner un petit canot électrique dans le bassin entourant le phare central de l'exposition. Jules Verne proposait mieux, son moderne sous-marin Nautilus naviguait avec de puissantes piles au sodium, extrait de l'eau de mer par un procédé inconnu

Gaston Tissandier, physicien passionné d'aérostation, faisait voler dans l'exposition un modèle réduit du dirigeable à propulsion électrique qu'il pilota deux ans plus tard. L'appareil long de 3,5 m, gonflé à l'hydrogène, supportait une charge de 2 kg ; il était propulsé à 1 m/s par l'hélice d'un petit moteur Trouvé, alimenté par un couple d'accumulateur Planté (zj). La force électrique recelait de séduisantes perspectives pour la locomotion terrestre, maritime et aérienne (IV-5)



zj Aérostat électrique de G.Tissandier - modèle réduit

Transmission à distance et distribution de la force électrique

Ce grand défi hantait les électriciens, depuis que cette énergie pouvait être produite en relative abondance. Il fut mis au programme de la troisième section de la deuxième partie du Congrès, dans les *questions spéciales pouvant donner lieu à un échange utile d'idées.* Il était encore un peu trop tôt pour envisager réellement des applications.

Les deux problèmes, transmission et distribution étaient à dissocier.

– Pour le **transport** à distance, on se doutait bien en appliquant les lois de Joule et d'Ohm qu'il faudrait monter en tension, mais comment? Y aurait-il des pertes aux nombreux supports des fils? D'autres problèmes inconnus se poseraient-ils?

– Pour la **distribution** de l'énergie d'une ou plusieurs machines à plusieurs appareils, comment assurer une répartition entre les différents appareils, consommant une énergie variable ou bien mis à l'arrêt ? Trois conditions étaient à remplir, définies par Marcel Deprez :

1- Tous les appareils récepteurs doivent recevoir chacun leur part d'énergie, fonctionner d'une façon indépendante et sans s'influencer les uns les autres.

2- La régulation nécessaire pour ce résultat doit s'opérer automatiquement et instantanément, par action seule de l'appareil et sans l'intervention de surveillants.

3- La régulation doit être telle que le générateur ne produise à chaque instant que la quantité totale d'électricité nécessaire au service des appareils en action.

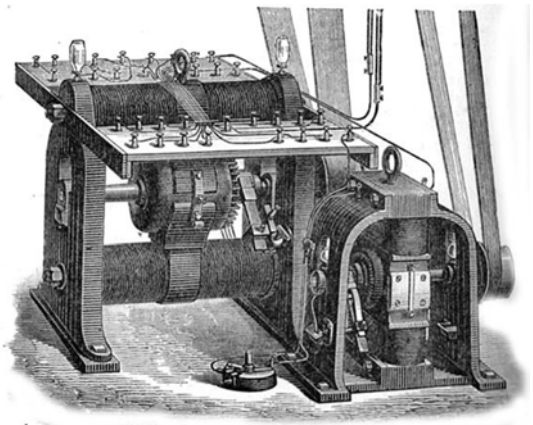
Aucun électricien d'aujourd'hui ne se pose ces questions qui n'en sont plus. Au début d'une invention, on imagine des difficultés à résoudre. A l'inverse, on en ignore d'autres parfois rédhibitoires. Ce fut le cas.

Deprez, qui deviendra l'un des pionniers du transport de force, monta à l'exposition une expérience peu spectaculaire pour le public, mais importante pour les spécialistes. Les deux fils de sortie d'une génératrice Gramme faisaient un circuit long de 1,8 km à l'intérieur du Palais de l'Industrie et alimentaient 27 appareils répartis tout le long de ce câble. Il y avait des machines à coudre, scies, machine à tresser les câbles, lampes à arc, presse à imprimer, mises en service ou arrêtées au hasard.

Sur le plan du transport, la longueur de 1,8 km n'était pas vraiment significative. Pour la distribution, Deprez avait adopté une machine avec deux enroulements inducteurs, comme Gramme sur ses premiers prototypes. Un inducteur était parcouru par le courant d'une petite machine indépendante, produisant un champ constant ; l'autre était parcouru par le courant propre débité par la génératrice. Ainsi plus celle-ci débitait, plus son champ inducteur était renforcé (zk).

Ce système automatique, utilisé aussi dans le régulateur Maxim, a été dénommé ***l'excitation compound***. Les générateurs Edison étaient encore régulés manuellement, en insérant une résistance variable dans le circuit inducteur, d'ou perte inutile.

Deprez avait ainsi conçu l'embryon d'un réseau de distribution automatique à charge variable, comme l'avait fait Maxim et le fera Edison pour son grand projet de réseau d'éclairage dans Manhattan.



zk Régulateur de tension Deprez

Quant au problème de la transmission à distance, c'était un challenge difficile qui demandera 10 ans pour être résolu, objet du chapitre IV-2.

Le Congrès international des électriciens

Avant la clôture de l'exposition, s'ouvrait le 15 septembre 1881 au Palais de l'Industrie le premier congrès international réunissant 256 délégués de 26 pays.

Le ministre des Postes et Télégraphes, M. Cochery, ouvrait la première séance par la mise en place des présidents de section et l'organisation. La langue utilisée était le français, resté longtemps langue internationale après le latin.

Les séances comprenaient :

– des séances plénières, consacrées à la discussion des questions exigeant une entente internationale suivi d'un vote du Congrès

– des séances de sections consacrées à l'exposé et la discussion de questions spécifiques

– des séances publiques où les membres pourront faire des conférences sur les sujets d'actualité.

Trois sections furent constituées, elles siégeaient dans la journée à des heures différentes permettant à chacun d'en suivre plusieurs.

– La première section des **Unités électriques** devait aboutir à l'adoption d'un système international des Unités et étudier la théorie de l'électricité, l'électricité atmosphérique, le magnétisme terrestre, les paratonnerres et l'électrophysiologie.

– La deuxième section devait définir les mesures à prendre pour faciliter le service des **lignes télégraphiques** et câbles sous-marins internationaux, ainsi que les signaux de chemin de fer.

– La troisième section s'intéresserait **aux autres applications** de l'électricité, mesure de l'intensité lumineuse, transmission de force et distribution, utilisation des forces naturelles comme l'hydraulique, horlogerie et chronographie, instruments de précision, électrométallurgie.

La première section fut la plus concrète, sa commission des unités fit adopter à l'unanimité, en séance plénière, la résolution suivante :

1) On adoptera pour les mesures électriques, les unités fondamentales : **centimètre, gramme, seconde** (C.G.S.)

2) Les unités pratiques, l'***ohm*** et le ***volt***, conservent leurs définitions actuelles.

3) L'unité de résistance, **ohm,** sera représentée par une colonne de mercure d'un mm2 de section à la température de 0 °Celsius.

4) Une commission internationale sera chargée de déterminer par expériences, la longueur de cette colonne (4).

5) On appelle ***ampère*** le courant produit par un volt dans une résistance d'un ohm.

6) On appelle ***coulom****b* la quantité d'électricité définie par la condition qu'un ampère donne un coulomb par seconde.

7) On appelle ***farad*** la capacité définie par la condition qu'un coulomb dans un farad donne un volt.

Cela mettait fin aux confusions résultant des différentes unités utilisées en France, Angleterre et Allemagne, l'ohm et le volt anglais, le daniell, le siemens, le weber allemand.

Par contre, en photométrie la complexité de la question ne permit pas d'aboutir à une unité d'intensité lumineuse, on conserva quelques années encore le carcel et la bougie.

Les travaux de la deuxième section se réduisirent à des échanges d'idées et la formulation de veux. Ceux de la troisième section furent animés par des discussions au sujet du transport de force. Marcel Deprez ayant exposé sa théorie : (5)

« Le transport de l'énergie électrique a telle distance que l'on voudra, sans besoin d'accroître la section du fil, n'est qu'une question de pression (tension) *au départ »* .

Elle fut contestée par plusieurs spécialistes, Fontaine, Cabanellas, Boistel et autres, plus sur les mots et surtout les moyens pour accroître la tension. Il se constitua ainsi un clan contre la personnalité de Deprez, qui se fit à cette occasion quelques ennemis ; ils eurent leur revanche cinq ans plus tard. Plusieurs quittèrent le Congrès et formèrent un congrès bis dont il ne sortit rien de très concret.(6)

Le Congrès s'acheva le 5 octobre sur un discours de M. Dumas, secrétaire de l'Académie des sciences, dont la brillante conclusion fut :

Le 19è siècle sera le siècle de l'électricité.

En 1883 fut créée la Société Internationale des Electriciens SIE regroupant les sociétés nationales, dont la Société Française des Electriciens SFE qui regroupa en 1972 la SFER, Société des Electroniciens et Radioélectriciens. En 1985 elle devient la Société de Electriciens et Electroniciens, SEE, et en 2000, la Société de l'Electricité, de l'Electronique et des TIC, technologies de l'information et de la communication.

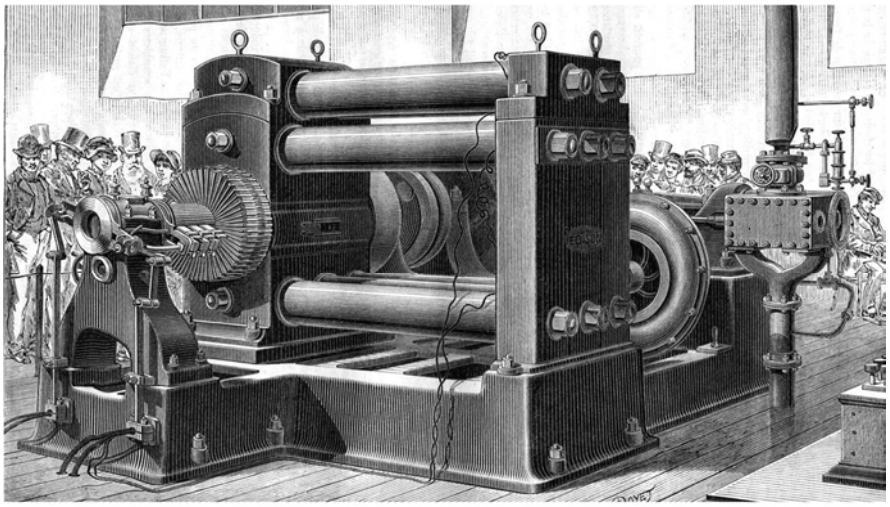
Arrivée tardive de la grande machine d'Edison

Dans sa volonté de dominer le monde technique et les autres constructeurs de systèmes d'éclairage, Edison avait prévu d'étonner à l'exposition avec sa grosse machine *Jumbo* pour 1000 lampes, mais ses ambitions se heurtaient parfois à des problèmes à leur mesure.

Après démontage et transport par mer, la machine ne fut déchargée au Havre que le 21 septembre, avec les engins de levage rustiques de l'époque.

Trente tonnes pour l'ensemble avec moteur à vapeur, dont 17 t pour le générateur, avec un induit de 2,5 t Le transport par fer et le remontage ne permirent sa présentation à l'expo qu'à mi-septembre, peu avant la fermeture.

Ce fort retard fut ignoré pratiquement par la presse, conditionnée par les conférences régulières qu'animait l'équipe d'Edison. On oublia que la plupart des milliers de lampes Edison brillaient avec du courant fourni par d'autres machines – de moins bonne qualité, d'après les hommes d'Edison !



zl Dynamo Jumbo d'Edison pour 1000 lampes

Sa puissance électrique était de 70 ch, soit 500 A, sous 103 V, pour 700 lampes. Possibilité de monter à 1000 ou 1200 lampes en ventilant l'induit. On remarque sur la gravure (zl) les 5 + 3 inducteurs, dissymétriques et anormalement longs, dont le courant était réglé par rhéostat manuel. Le rendement, d'après la revue *Engineering*, aurait été de 47%, ce qui nécessitait un moteur d'au moins 140 ch.

Pour 1000 lampes, le rapport du poids par ch électrique était énorme, 170 kg par ch, alors que pour les générateurs Gramme, il était de 40 à 50 kg/ ch.

L'année suivante, l'Anglais J.E. Gordon réalisait une grande dynamo pour courant alternatif d'un poids équivalent, 18 t, mais capable d'éclairer 5000 lampes Swan, soit 5 fois plus que la Jumbo. Pour étudier sa gamme de dynamos, Edison qui n'avait que des connaissances très sommaires en électromagnétisme, n'a pas su s'entourer de compétences dans son équipe. Il a dû faire appel plus tard à l'Anglais Hopkinson puis le Français Picou pour reprendre leur conception, vraiment mauvaise aussi bien en rendement qu'en poids, donc coût.

Jury des récompenses et bilan

Comme dans toutes expositions, le Jury se réunit pour distribuer les prix rapidement, le 21 octobre, pour permettre aux étrangers venus pour le Congrès de rentrer chez eux.Une liste non exhaustive donne un aperçu des notoriétés de l'époque.

Les diplômes d'honneur aux établissements industriels étaient : Pour la France, Breguet, Christofle et Société générale des téléphones (Ader). Pour l'Allemagne, Siemens et Halske. Pour l'Angleterre, Eastern telegraph, Siemens Brothers a. Co., Submarine Telegraph, Telegraph Construction a. Maintenance.

Les diplômes d'honneur aux inventeurs : Pour la France, Baudot, Deprez, Gramme, Planté.

Pour l'Angleterre, Hughes et W. Thomson.

Pour les États-Unis, Bell, Edison.

Pour l'Allemagne, W. Siemens.

Pour la Norvège Bjerkness.

Pour l'Italie, Pacinotti, mais cette dernière décoration n'a pas calmé les revendications de l'inventeur d'une dynamo qu'il n'avait même pas réussi à développer ou faire développer en 15 ans ; il déposera, sans succès dans son propre pays, une nouvelle réclamation auprès du Jury de l'exposition de Turin en 1884.

Suivaient 78 médailles d'or, 106 médailles d'argent et 262 médailles de bronze (7). On peut s'étonner de la place d'Edison, *inventeur,* alors que Swan et Maxim n'avaient qu'une médaille d'or et Lane Fox même pas la médaille de bronze, le lot de consolation qu'il méritait bien. Inévitablement des querelles surgirent dans la presse sur ce palmarès.

L'exposition ferma ses portes le 20 novembre après deux jours d'accès gratuit, pour la satisfaction de 80 000 visiteurs. Un grand nombre d'entrées gratuites avaient déjà été distribuées aux écoles et ouvriers des ateliers.

Compte tenu des 673 000 entrées payantes, à 1,50 F, on peut considérer que près d'un million de visiteurs, français à 90%, ont découvert un monde nouveau. C'était beaucoup sur un thème scientifique et technique, mais relativement peu en regard des 5 à 10 millions de visiteurs des expositions universelles.

Les recettes d'un million de F, ont laissé un bénéfice de 330 000 F. Ce bénéfice fut affecté à la création d'un Laboratoire Central d'électricité, géré par le Ministère des Postes et Télégraphes, et revint 15 ans plus tard à l'Ecole Supérieure d'Électricité, à défaut de la Faculté des sciences pas intéressée par cette nouvelle science (8).

Un bilan très satisfaisant en tous points. Par surcroît, ce n'était encore qu'un début, comme la décennie 1880 va le prouver.

L'exemple était donné, d'autres expositions techniques sur les progrès de l'électricité vont suivre : Munich et Londres en 1882, Vienne et Londres en 1883, Philadelphie et Turin en 1884, Paris en 1885, Francfort en 1891.

En sortant de l'exposition, Victor Hugo, répondait à un ami qui lui demandait ses impressions :

Je pense que l'homme est en marche vers un avenir extraordinaire. L'électricité, qui a produit par la création du télégraphe une sorte d'élargissement de la patrie, lui donnera l'étendue du globe.

L'audition, la vision des milieux animés pourront être d'un geste, transportés au loin : de là, suppression complète de tous les exils, et par suite, solution de la question sociale.

C'est une erreur de dire que les malheureux n'ont rien en naissant. Tout homme naît propriétaire. Il suffit qu'il consente à se déplacer pour aller prendre possession de son bien, la moitié du globe habitable est inhabitée. Pourquoi laisser toutes ces terres en friche ? Pourquoi négliger des trésors qui s'offrent à ceux qui viendront les chercher ?

Ce n'est pas tout. Le jour est proche où la surface du globe sera aménagée pour emmagasiner la chaleur solaire ; or, qu'est-ce que la chaleur ? C'est la lumière, c'est le mouvement.

Transformée en électricité, cette chaleur sera distribuée partout, éclairant la nuit les voies publiques, faisant tourner les machines, traînant les locomotives.

J'ai dit cela il y a quarante ans, et je le redis aujourd'hui. L'avenir sera splendide, équitable, libérateur. Il sera beau et bon. Vous verrez ces merveilles, vous qui êtes jeunes.

Ce discours enthousiaste illustre le *scientisme* de l'époque, la science va apporter le bonheur à l'humanité par le progrès. Discours véhiculé plus souvent par les intellectuels et philosophes que par les scientifiques et industriels eux-mêmes.

- Hugo perçoit bien l'élargissement de l'horizon national au niveau mondial, déclenché par l'intense circulation de l'information via le télégraphe, puis le téléphone. Il pressent même la diffusion de l'image animée.
- Mais il ne réalise pas que l'appropriation par tous des terres désertes, en principe inhabitées, serait l'amorce de la colonisation, et semble ignorer le massacre récent des 40 explorateurs de la mission Flatters pour établir le projet du chemin de fer transsaharien.
- La photoélectricité directe fut découverte en 1885 avec le sélénium, mais même aujourd'hui avec le silicium, elle ne permet pas de tirer des trains autonomes, tout juste une très légère voiturette électrique, si le soleil brille.

Compléments

1- Les grandes expositions universelles étaient en ce XIX^e^ siècle un média important pour informer le public et permettre aux professionnels de se rencontrer sur tous les thèmes, arts, architecture, découverte du monde et surtout les progrès techniques de la révolution industrielle en marche. L'autre média, la presse et les revues, n'étaient lus que par une minorité.

L'Angleterre, premier pays industriel, organisa en 1851 *The Great Exhibition on the Works of Industry of All Nations* à Londres, au Crystal Palace, avec 14 000 exposants, 6 040 000 visiteurs payants. La France, deuxième pays industriel, enchaîna avec l'expo de Paris en 1855 avec 24 000 exposants, 5 160 000 visiteurs, pour laquelle fut construit le Palais de l'Industrie, sur le grand axe des Champs Elysées, symétrique du Palais artistique du Louvre, par rapport à la Concorde.

Conçu avec une immense verrière, capable d'apporter la lumière du jour à cet espace intérieur, Il fut démoli en 1900 et remplacé par le Petit Palais et le Grand Palais, prévus pour l'éclairage électrique intérieur.

Les musées des autres grandes villes avaient le même problème d'éclairage des grands musées, uniquement par la lumière du jour, le gaz étant insuffisant. A Londres, Vienne, Munich c'étaient Cristal Museum ou Glasspalatz avec d'immenses verrières. Cela conditionnait toute leur architecture et nécessita leur démolition après 1881 en adoptant l'éclairage électrique.

Suivirent les autres expos : Londres en 1862 (28 700 exposants. - 6 212 000 visiteurs). Paris en 1867 (52 200 ex.- 11 000 000 vis.). Vienne 1873 (42 000 ex. -7 255 000 vis.). Philadelphie 1876 (30 000 ex.-9 858 000 vis.). Paris 1878 (52 800 ex.-16 032 000 vis.). Paris 1889 (61 800 ex.- ;32 151 000 vis.) dont il reste la Tour Eiffel. Chicago 1893 (2 530 000 vis.). Paris 1900 (83 000 exp.- 50 861 000 vis), la plus importante en un siècle.

ORY PASCAL, *Les expositions universelles*, Ramsay, 1982, Paris.

On reste surpris du nombre de visiteurs, des millions, malgré les difficultés de voyager, uniquement par un chemin de fer encore peu rapide, 60 km/h en moyenne, et coûteux. Avant 1881, dans toutes ces expositions, l'invention électrique essentiellement présentée était le télégraphe. Il n'y avait d'ailleurs pas encore d'ingénieurs électriciens, mais des télégraphistes.

2- On constata occasionnellement que parmi toutes matières pour **fabriquer les courroies** d'entraînement des générateurs par leurs moteurs, c'était le crin de cheval qui s'avérait être le plus résistant à l'usage, mieux que différents cuirs, la tresse métallique et autres.

3 - Projet de métro - GASTON TISSANDIER - *Les chemins de fer électriques à Paris,* La Nature, 1881/2, p.308.

4 - Ohm -La longueur de la colonne de mercure sera fixée à 106 cm au congrès de Paris en 1884.

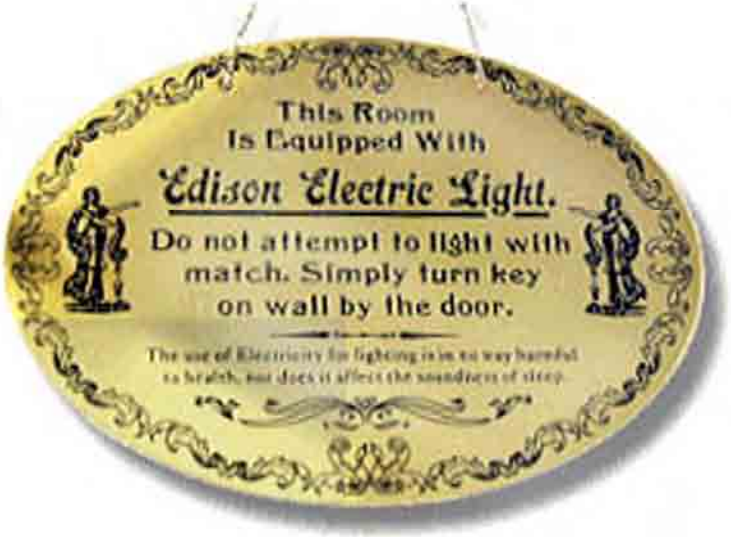
5 - La lumière électrique, très favorable à **Deprez**, publia sa théorie : *Transport et distribution de l'énergie par l'électricité,* le 3/12/1881 sur 23 p.

6 - Cabanellas - *Organisation automatique du transport et de la distribution de l'énergie* - Imprimerie nationale, Paris, 1881, 74 p.

7 - Diplômes et médailles - Lumière électrique, 1881/3, p.142/148.

8 - Laboratoire et École Supérieure d'Electricité. On remarque à nouveau (II-3, c 7) que cette nouvelle science avec ses techniques, l'électricité, n'était pratiquement pas enseignée par l'Université en France, d'où nécessité de la création d'une École et d'une institution de recherche spécialisée.

Cauchemar d'un gazier anglais, menaçé par les électriciens et leurs lampes



5 - Développement de l’éclairage électrique

après l’exposition

Sans les multiples aspects esthétiques, pratiques et techniques de ce très nouveau système d’éclairage, l’exposition n’aurait sans doute pas eu la moitié de ses visiteurs grand public. Ce fut un incontestable succès, si ce n’étaient quelques pannes d’électricité acceptables pour une installation provisoire regroupant une puissance jamais atteinte. Certains affichèrent leurs critiques, tels les barons Rothschild, malchanceux, qui déclarèrent à la deuxième panne qu’ils continueraient à s’éclairer au gaz.

Les lampes à arc étaient au point, celles à incandescence débutaient leur commercialisation ; les générateurs dont c’était encore la principale utilisation se multipliaient. Restaient cependant à définir les solutions techniques, économiques et commerciales qu’allaient adopter les différents concurrents pour répondre aux besoins d’éclairage, très variés depuis la maison ou l’appartement aux commerces, grands magasins, lieux publics, gares, théâtres, usines.

Auparavant, il faut évoquer une grande opération de communication, évènement nouveau dans le monde industriel en gestation, et qui va largement influencer les développements à venir.

La puissante campagne publicitaire Edison

La lecture des nombreux livres, revues et journaux français qui nous relatent l’exposition laisse une certaine perplexité. C’est l’admiration sans réserve et bien compréhensible pour l’éclairage électrique, mais présenté comme l’œuvre géniale d’un seul personnage, Edison, dont la science et la sagacité lui auraient permis de résoudre tous les difficiles problèmes, sur lesquels jusque-là ses prédécesseurs auraient échoué. Les concurrents d’Edison sont totalement ignorés.

Edison avait fait éditer en 1882 une brochure promotionnelle de 86 pages, fort bien conçue dont le titre *La Lumière Edison*, considère d’emblée que l’éclairage électrique ne peut être que celui d’Edison. L’argumentation développée est celle mise au point pour les journaux lors de l’exposition, par le commando Edison envoyé à Paris, Batchelor, Moses, Puskas et Bailey : aucune critique des concurrents, même voilée, ni les considérer comme des copieurs, car la comparaison ne serait pas vraiment un avantage ; la stratégie consiste à les ignorer. Par contre, on souligne la supériorité de l’électricité, incontestable sur le gaz, polluant, dangereux et cher, ce qui est évident. La lampe à arc ne peut convenir non plus dans les intérieurs, trop puissante et peu pratique, ce qui est naturel.

L’introduction donne le style : *En commençant ses recherches sur la lumière électrique, Edison s’est immédiatement posé le problème suivant : Créer un système complet d’éclairage par l’électricité, qui puisse se substituer purement et simplement au système actuellement en usage de l’éclairage par le gaz… L’exposition de 1881 a montré, au monde étonné des savants et des industriels, qu’il avait suffi de deux années à Edison pour remplir entièrement son gigantesque programme, et vaincre une à une les innombrables difficultés qui avaient surgi sur son chemin.*

À voir ce système si complet, qu'à la façon de la Minerve antique il a du sortir de toutes pièces du cerveau de son inventeur, tant les différentes parties s'harmonisent, tant les moindres détails ont été prévus, tant surtout chaque organe est bien adapté au rôle qu'il doit jouer.

La brochure se termine par une dizaine d'articles parus dans la presse au cours de l'exposition. *…Leur unanimité à constater les ressources industrielles du système Edison, à en envisager l'application sous toutes les formes, dans tous les milieux, confirmera dans l'esprit des lecteurs l'idée de praticabilité et d'économie du système Edison, que nous nous sommes attachés à mettre en relief dans les descriptions précédentes.*

Suivent ces extraits dont le ton plus qu'élogieux paraît surprenant, tous ces journalistes étant censés faire de l'information impartiale. Certains ont été reportés en (1)

Dans le livre important, ***Electricité,*** du célèbre vulgarisateur scientifique Louis Figuier, on constate dans l'édition 1883 que 34 pages sont consacrées à Edison, 7 à Swan, 5 à Maxim, 1 à Lane Fox. Aucune aux autres concepteurs de lampes américains.

Dans les revues, dont la principale, ***La lumière électrique,*** le nombre d'articles successifs parus au cours du deuxième semestre 1881 le constat est analogue. Dans son numéro du 1/10/1881, Théodore du Moncel, directeur de la revue, scientifique reconnu, fait une analyse sur les quatre systèmes de lampes à incandescence figurant à l'exposition.

Déjà dans l'introduction, il note : *nous commencerons, naturellement, par celui de M. Edison, qui a fait le plus de bruit et qui a attiré l'attention sur cette manière de produire l'éclairage par l'électricité.* Suivent 9 pages illustrées consacrées à Edison, 3 à Swan, 2 à Maxim, 1,5 à Lane Fox. L'auteur fait d'emblée une surprenante repentance : *Quand on annonça en 1879 la nouvelle lampe à charbon incandescent, celle de M. Edison, beaucoup de savants et moi-même doutèrent des allégations qui nous venaient d'Amérique.…Pourtant M. Edison ne se tint pas pour battu et malgré la vive opposition qu'on fit à ses lampes, il ne cessa de les perfectionner au point de vue de la pratique, et il est arrivé aujourd'hui aux lampes dont tout le monde peut admirer la parfaite fixité…Dans leurs conditions actuelles, ces lampes sont suffisamment solides et peuvent durer longtemps…*

Ce comportement servile d'une majorité des journaux en faveur du système Edison intrigue, et laisse à penser que ces journalistes auraient cédé à des pressions. Le lecteur a pu constater dans les pages précédentes qu'il n'y avait guère de différence entre les lampes des quatre concurrents, que le système d'Edison avait un peu plus d'accessoires pour l'installation, et que ses machines productrices par contre, n'étaient que de mauvaises copies de Gramme et Siemens.

L'explication a mis un siècle pour nous parvenir. En 1985, **l'historien anglais Robert Fox**, professeur d'Histoire des sciences à Oxford, a fait une étude sur ce thème en travaillant sur les archives de correspondance du *National Historic Site* situé à West Orange (New Jersey), *Edison et la presse française à l'exposition internationale d'électricité de 1881* (2).

Quelques extraits : *…cette correspondance suggère que la rapidité et l'universalité du triomphe d'Edison ont été en grande partie dues à une manipulation systématique de l'opinion publique, au moyen de nombreuses conférences ou sollicitations, et surtout de la persuasion exercée sur la presse parisienne, tant spécialisée que générale…notre but n'est pas de minimiser la compétence technique d'Edison…non plus discréditer les journalistes, savants et vulgarisateurs qui ont accepté d'appuyer Edison.*

*Mon intention est simplement de démontrer qu'**il est impossible de comprendre les succès parisiens du camp Edison en des termes exclusivement technologiques.***

Du Moncel, rédacteur en chef de la *Lumière électrique*, avait accepté en juillet, *…moyennant des honoraires de 1000 F par mois pendant toute l'exposition, de consacrer sa plume et son influence personnelle dans la presse à la campagne édisonnienne.*

Camille Flammarion, influent auprès du Congrès et du Jury, *…avait été engagé par la compagnie Edison, lui aussi, avec des honoraires de 1000 F par mois, plus une compensation supplémentaire selon les circonstances.*

…Vulgarisateurs scientifiques et propriétaires de la presse périodique furent plus que prêts à vendre leur influence, mais le prix était souvent âprement discuté.

…On persuada l'agence Havas d'adresser les informations nécessaires à plusieurs centaines de journaux provinciaux et étrangers.

…Mais le plus grand coup devait être l'accord avec le Figaro spécifiant « aucune publication ne se fera dans le Journal concernant votre lampe à incandescence, si ce n'est en votre faveur ». Le prix fort élevé de 100 000 F fut échangé contre *un poste d'administrateur dans les filiales européennes Edison.*

…Le but principal de cette étude a été de montrer que le « système » d'Edison comportait (en plus) une stratégie résolue de publicité et de persuasion personnelle, afin de l'emporter dans cette lutte brutale pour la réussite que fut l'exposition. …Cette stratégie fut coûteuse, une grande part des 200 000 F que le Syndicat d'Edison avait mis à sa disposition pour financer l'exposition.

…L'enjeu était considérable, le quasi-monopole européen pour sa lampe, le but fut atteint… le prix payé par Edison paraît bien modeste en regard d'un tel marché.

Fox remarque que deux hommes de presse importants, Edmond Hospitalier, directeur des revues *La Nature* et *L'Electricien*, récemment fondées, ainsi que Gaston Tissandier, résistèrent aux persuasions financières des hommes d'Edison. Ils continuèrent à publier des articles favorables au système Maxim, tout en ayant une position de neutralité bienveillante vis-à-vis d'Edison.

Swan, qui en matière de publicité n'était qu'un naïf, conservait aussi des partisans dans ce que *L'électricité* appelait la bataille des lumières. L'un de ses supporters était le physicien italien Galileo Ferraris. Ce qui n'empêcha pas Milan et Rome d'être éclairée quelques années plus tard par la Compagnie Edison italienne.

La grande chance qu'Edison a bien exploitée était l'absence de la France, comme de l'Allemagne, dans la course à la lampe à incandescence, se consacrant d'abord à celle à arc. Sinon il est probable qu'un tel ralliement de la presse au camp Edison aurait été clairsemé. Dans cette compétition entre Américains et Anglais, le nationalisme français de l'époque penchait naturellement pour l'Amérique, et entre les deux Américains, on préférait le charisme du savant réputé à Maxim, industriel inconnu en France.

Pourtant dix ans plus tard, l'un des piliers de *La lumière électrique,* F. Géraldy, rendait à Swan la paternité de la lampe (24/1/1891) dans ces termes : *…Quoique la question reste légalement douteuse, je considère que celui qui amena réellement la lampe à incandescence à l'état pratique fut Swan. Les succès relatifs obtenus à Newcastle ont donné l'éveil à la grande fabrique d'inventions américaine. Celui-ci, avec ses puissants moyens de recherches, a couru plus vite que le modeste savant anglais, en sorte qu'Edison et Swan sont arrivés au but ensemble, mais celui-ci était parti le premier et avait ouvert la voie.*

Tout cela permet de comprendre le fort engouement, inexplicable en termes techniques et économiques, dont bénéficia **Edison** et sa lampe à incandescence. Jusqu'aujourd'hui encore, il est **l'inventeur de la lampe à incandescence**, reconnu. Les mythes ont toujours eu la vie dure.

Nous le devons à R. Fox, **un historien, qui a cherché à comprendre**, sans se contenter de ce que bien d'autres avaient écrit avant – précisément la méthode et l'objectif de ce livre.

Edison, après l'exposition

Le système Edison terminait ainsi l'exposition en grand vainqueur sur le plan médiatique. Restait à concrétiser cet avantage :

— équiper les premières grandes distributions d'électricité pour l'éclairage ;

— éliminer si possible la concurrence par de longs procès en contrefaçon ;

— Implanter des filiales de fabrication dans les principaux pays,

C'est dans ces domaines qu'il fit preuve de son talent d'homme d'affaires, d'industriel et de manager. Cela compensait un peu sa nette déficience sur les plans scientifiques et techniques.

Pas suffisamment cependant pour les banquiers, qui l'élimineront des affaires après son incompréhensible erreur dans la guerre des courants quelques années plus tard.

Les premiers réseaux d'éclairage

Le grand projet d'Edison n'était pas de vendre des installations d'éclairage, clefs en main, des machines aux lampes, mais de créer des réseaux électriques urbains pour alimenter l'éclairage des particuliers, comme le gaz qu'il considérait comme son seul grand concurrent. Ses financiers le poussaient dans cette voie, c'était plus intéressant de vendre du courant chaque mois à des milliers d'abonnés que de vendre une seule fois le matériel d'une installation. L'expérience du télégraphe, puis du téléphone l'avait démontré.

Dès 1880, sa lampe étant en cours de mise au point, il avait obtenu l'accord pour fournir l'électricité à tout un quartier de Manhattan. Il y avait des retards, une occasion se présenta de réaliser rapidement un tel réseau à Londres dans une rue, **Holborn Viaduct**, favorable à cette démonstration, elle était dans un quartier d'affaires et située sur un pont surélevé au-dessus d'autres voies, cela permit d'accrocher les canalisations électriques sous le pont, sans avoir à les enterrer. La ville, sous la pression des compagnies gazières, ne donna qu'un accord temporaire de deux ans, suivant les règles du récent *Electric Act*, limitant le développement électrique. La grosse dynamo Jumbo de l'exposition de Paris fut installée dans un immeuble de la rue, acquis par Edison. Le 12 janvier 1882 s'allumèrent 900 lampes dans les immeubles éloignés au plus de 600 m, en raison de la faible tension de 100 volts. Ce fut un test d'essai et mise au point pour l'installation en cours à New York, du système de sécurité et de la régulation automatique en fonction des ampoules allumées. Le professeur John Hopkinson étudia le fonctionnement en tant que conseil et proposa des améliorations. Pendant trois mois, la compagnie Edison assura gratuitement l'éclairage public d'un tronçon de la rue.

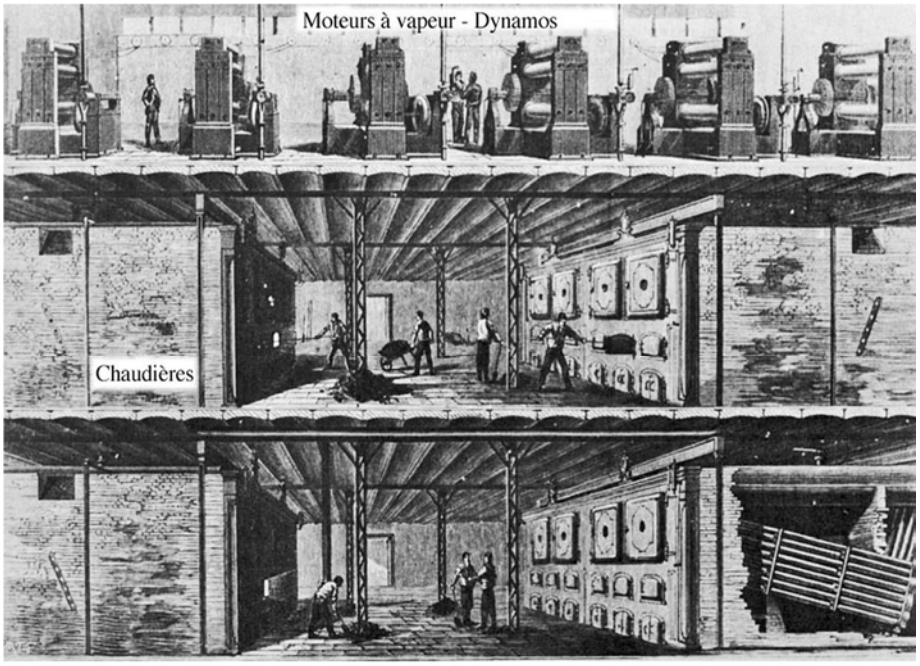
L'évènement mondial fut la mise en service, après 18 mois de travaux, de la station centrale d'éclairage de l'*Edison Illuminating Company* dans le quartier de **Pearl Street,** haut lieu de la finance à New York (a).

C'est à partir du bureau du banquier J.P. Morgan, principal actionnaire de la compagnie, que le 4 septembre 1882, celui-ci appuya sur le bouton de démarrage. Il alluma les premières lampes installées dans les maisons et commerces, en particulier les bureaux du *New York Herald* et du *Times* qui donnèrent à l'évènement l'écho qu'il se devait.

a Manhattan - Pearl Street District

Fin 1882 il y avait 230 clients avec 3400 lampes ; en 1884, 500 abonnés avec 11 000 lampes en service.

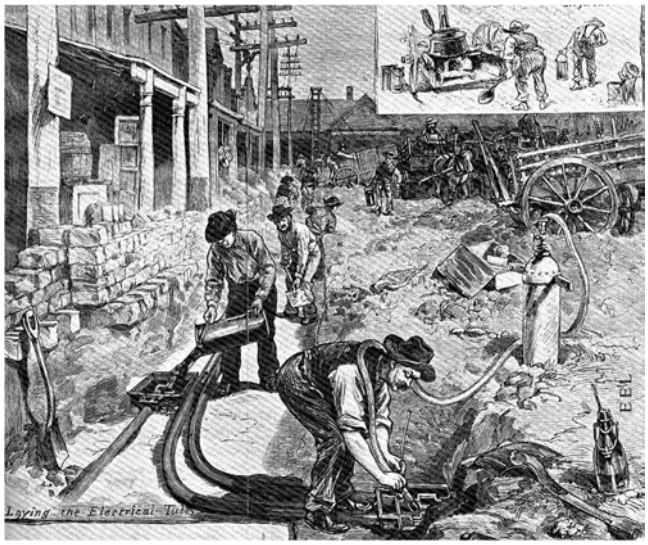
Au 257 de la rue, à la puissante station centrale (b), première au monde, tournaient 6 dynamos Jumbo, actionnées par leurs moteurs à vapeur Porter Allen, à partir de la vapeur de 4 chaudières Babcok et Wilcox. Les halls à charbon étaient approvisionnés par chars à chevaux depuis les quais de l'East River, bordant le quartier. Les Jumbos alimentaient sous 100 volts chacune 1000 à 1200 lampes de 32 bougies ou 1800 lampes de 16 bougies.

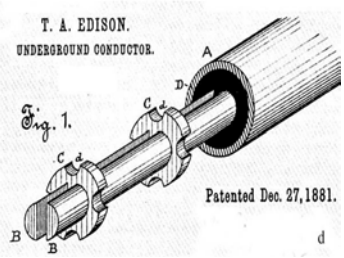


Pearl Street Station - 1882

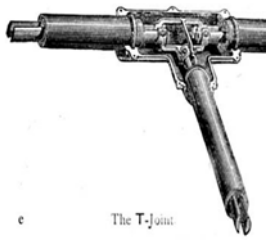
Ce fut un très gros chantier (c). Les canalisations électriques longues de 14 milles au total devaient être souterraines, comme celles du gaz. Peut-être en raison de leur section importante, Edison n'utilisa pas de câbles toronnés, mais des tubes renfermant des conducteurs en cuivre rigides isolés par des pièces spéciales (d) (e).

Chaque abonné était raccordé par un boîtier contenant un fil de plomb fusible comme protection contre le court-circuit (f), et d'un compteur (III-2, fig r).


c Conduites électriques à Manhattan - 4/1882



d


e The T-Joint

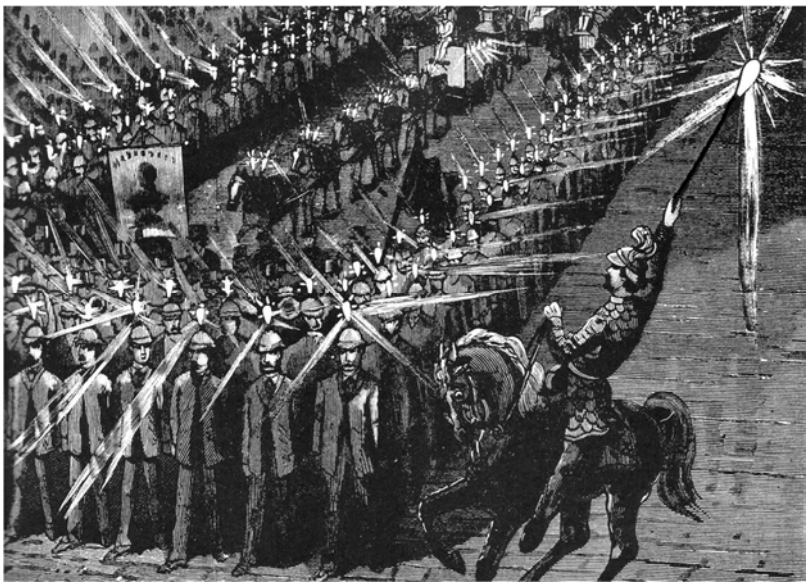
Mais en raison de la tension de 100 V, on ne pouvait raccorder que des abonnés éloignés au plus d'un demi-mille.

Il n'y eu pas trop de pannes, si ce n'est un grave incendie à la centrale en 1890, mais l'interruption ne dura que 11 jours. La centrale fut démantelée en 1895 et jamais remplacée. On avait découvert avec le *smog de* Londres que la pollution de la fumée noire sortant des cheminées des puissantes machines à vapeur était une catastrophe en pleine ville. Il fallait placer les centrales à la périphérie, mais à une distance impossible avec le courant continu.

Pearl Street fut une prouesse technologique et industrielle, l'apparition de la notion de réseau répartissant l'énergie à partir d'une *Station centrale,* principe que l'on retrouvera dans les projets contemporains de Deprez. Mais le grand handicap était la trop courte distance de l'utilisateur à la centrale, ce qui nécessiterait des dizaines de centrales dans une grande ville. Ce défaut fut un peu atténué lorsque Hopkinson proposa le système à 3 fils : deux dynamos 110 V sont couplées en série et alimentent deux groupes de lampes avec un conducteur commun, ce qui permet d'économiser 62 % de cuivre en distribuant à 1 km.

Sur le plan financier, la performance fut médiocre pour une première installation avec de nombreux imprévus. La rentabilité s'amorça après quelques années.

Le mouvement était lancé, mais le projet d'Edison de vendre uniquement de l'électricité fournie par ses propres centrales s'avérait limité.



The electric torchlight procession in New York - 1884

Le marché le plus important se révéla être celui des *installations autonomes*, usines, fabriques, théâtres, hôtels, bureaux, châteaux, qui voulaient disposer de leur propre centrale et réseau interne.

Une statistique indique qu'aux États-Unis il y avait en 1885, 24 centrales Edison totalisant 68 850 ch pour 51 400 lampes. Par contre, le nombre d'installations autonomes était de 494 totalisant 125 293 lampes.

Ce succès fut soutenu à la fois par l'élimination de la concurrence dans des batailles juridiques généralement gagnées, et par des manifestations publicitaires originales, tel ce défilé électrique de 1886 (g), où la machine à vapeur et le générateur de courant alimentant les lampes individuelles étaient tirés par un attelage de chevaux au milieu du cortège.

Les batailles juridiques

Parmi les centaines de brevets Edison, environ vingt étaient importants, le principal étant le premier sur la lampe à filament de carbone, le n 223898 du 27 janvier 1880, quatre mois après avoir découvert le filament de carbone, des années après les autres, quatre revendications y étaient stipulées :

a) Une lampe électrique devant produire de la lumière par incandescence, et consistant en un filament de charbon à haute résistance, relié à des fils métalliques.

b) L'emploi simultané d'un filament de charbon, d'un récipient entièrement en verre et de conducteurs traversant le verre. Le récipient est privé d'air.

Suivaient deux autres revendications sans importance. Aucun des chercheurs qui avaient déjà réalisé ce type de lampe avant cette date n'avaient songé à prendre ce genre de brevet, très général. Ce fut leur grand tort. Ce brevet d'une invention faite par d'autres, rapporta des sommes fabuleuses à son auteur et surtout ses financiers.

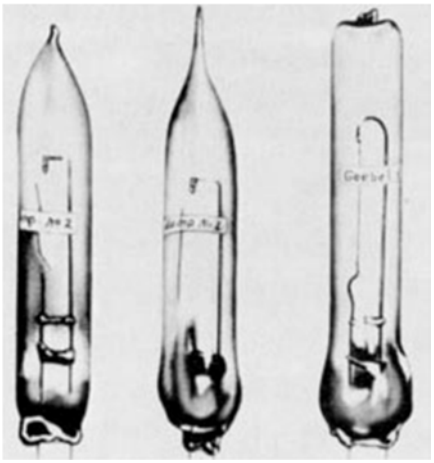
Les procès touchaient les fabricants dans leur propre pays et ceux où ils avaient breveté, ailleurs leurs succursales et les revendeurs suivant la législation différente dans chaque pays. En Amérique Edison déclencha 40 procès contre la compagnie United States Lighting, regroupant les brevets Maxim, Farmer et Weston. En Allemagne et Angleterre ce fut d'abord contre Swan, mais l'accord intervint en 1883, avec la création de la société commune *Ediswan*. En France, en l'absence de constructeurs nationaux, Swan et Maxim s'implantèrent, peu de temps pour le premier, mais Maxim du abandonner aussi après quelques années de procès.

Pour comprendre l'émergence des découvertes et leurs conséquences, notre objectif, il faut aussi intégrer les aspects juridiques basés sur les brevets. Néanmoins, l'histoire de ces procès Edison et leurs rebondissements serait trop longue et fastidieuse, elle fut la plus importante du siècle, sur le plan mondial ; celle du téléphone, assez semblable s'était déroulée essentiellement en Amérique.

En novembre 1893, les brevets Edison, gérés par Général Electric tombaient dans le domaine public. De la lampe Edison n'a survécu que le culot à vis, jusqu'à nos jours.

L'antériorité de dernière heure

En 1893, peu avant cette échéance, un dernier procès se déroulait entre la Général Electric et trois sociétés censées avoir copié ses brevets. Elles allaient être condamnées lorsque leur défenseur déclara que le brevet de base Edison était sans valeur, des lampes à incandescence semblables ayant été fabriquées 25 ans plus tôt par un certain Heinrich Göbel, venu d'Allemagne et américain depuis 1865 sous le nom d'Henry Göbel. Ce fut l'étonnement des juges, auxquels l'avocat présenta une série de preuves dont trois lampes fabriquée par ce fabricant d'appareils de précision, d'optique et de baromètres (j).



L'histoire était plausible, les ampoules étaient des flacons d'eau de cologne. Göbel avait la compétence pour obtenir un vide barométrique, mais il semblerait qu'il y ait eu amalgame entre faits réels et inventés par les juristes des sociétés cherchant à gagner leur procès contre Edison. L'affaire s'éteignit avec la mort de Göbel en 1893, puis la fin du brevet Edison en 1894.

Cependant, dans l'Allemagne des années 1920, le thème de l'invention de la lampe à incandescence par cet allemand né au village de Springe, à coté de Hanovre, resurgit pour des raisons de fierté nationale, appuyé par divers auteurs dont la très sérieuse revue technique ETZ (3). À nouveau après WW2. Un monument fut érigé à Springe, et sur la maison natale de Göbel fut apposée une plaque à coté d'une lampe à incandescence brûlant jour et nuit. Récemment, en 2007, un habitant de Springe, Hans Christian Rhode, docteur de l'université de Hanovre a fait paraître un livre, *Die Göbel légende*, concluant d'après ses recherches qu'il s'agissait d'une mystification.

Comme cela a été signalé, il y a souvent invention sans brevet et brevet sans invention réelle. Aussi Göbel est à classer dans le groupe des précurseurs qui ont fait brillé des lampes à filament de carbone dans le vide, sans pour autant atteindre le niveau technique d'une lampe fiable et industrialisable, à l'instar des quatre développeurs présents à l'exposition.

Implantations multinationales

Dans le développement d'un produit, les inventeurs sont souvent peu compétents pour en lancer la fabrication, suivie de la commercialisation. C'était l'inverse pour Edison dont les qualités exceptionnelles d'entrepreneur étaient l'organisation financière, industrielle et commerciale.

Ses objectifs commerciaux étaient de vendre son système d'éclairage dans le monde en développement industriel, limité encore à quelques pays européens. Il adopta alors une stratégie de mondialisation (4), déjà initiée par d'autres pour le télégraphe, tel Siemens. Ce fut d'abord l'implantation en France, en 1881, de la plus importante de ses filiales, la *Compagnie Continentale Edison*, C.C.E avec l'usine d'Ivry-sur-Seine, équipée pour fournir l'Europe. En Angleterre, ce fut la filiale commune *Ediswan*. Le marché progressant trop fortement au début, il fallut créer en 1883 deux autres sociétés, à Berlin la *Deutsche Edison Gesellschaft* dirigée par Emile Rathenau et à Milan la *Societa Generale Italiana di Elettricita, sistema Edison*.

Edison se rend compte alors que son grand projet de créer des sociétés vendant l'électricité comme le gaz ne couvre qu'une partie du marché. Il y a une forte demande de clients désireux d'avoir leur propre installation particulière, aussi il va créer en Amérique à cet effet l'*Electric Company for isolated lighting ;* en parallèle, l'*Edison Illuminating Company* va éclairer les villes à partir de stations centrales. Cette organisation est reproduite en France où la *Société électrique Edison* fera les installations autonomes, la *Continentale* se réservant les centrales urbaines de distribution.

En 1889 la compagnie d'origine, *Edison Electric Light Company*, est remplacée par *Edison Général Electric Company*, dans laquelle les banquiers pragmatiques ne laissent plus à Edison qu'un poste honorifique, avant de l'éliminer par le regroupement en 1892 avec son concurrent *Thomson Houston* dans la *General Electric Company*. (5)

Cette mise à l'écart restera discrète, afin de ne pas altérer l'image du grand savant, précieuse pour les banquiers et l'Amérique. L'*Electrical Engineer* (2/1892) considère *que l'attitude offensive, prise et maintenue avec persistance par M. Edison, contre les courants alternatifs, est une des causes primordiales de cet évènement. Il n'a pas voulu admettre les avantages de la distribution à courants alternatifs. Les autres les ont reconnus dès le début, et depuis six ans les alternateurs envahissaient les stations centrales, surtout là où il s'agissait de distribution sur de grands espaces. Tout le prestige du grand nom d'Edison a été mis en jeu pour enrayer le mouvement, mais le prestige peut avoir raison des arguments, jamais des faits établis…*

Son obstination dans l'erreur favorisera beaucoup l'émergence du futur grand concurrent, Westinghouse, champion du courant alternatif (IV-2).

Ce dernier construira lui aussi sa figure de proue avec Tesla, un autre « savant génial », d'ailleurs complètement opposé à Edison par le caractère, la méthode et les compétences. Ils ne partageaient tous deux, qu'une grande estime pour eux-même.

Les lampes Edison, qui deviendront *Mazda*, ne seront alors plus fabriquées avec la célèbre fibre de bambou, mais avec le filament en carbone de synthèse inventé par Swan ; il ne leur restera que la douille à vis d'origine de 1881, toujours la plus utilisée de nos jours, la seule véritable invention d'Edison dans la lampe.

En 1887, l'*Invention factory* de Menlo park est transférée à *West Orange* dans le New Jersey. Edison expliquait à l'un des visiteurs, E. Belin, que dans ce labo dix fois plus grand il pourra faire dix fois plus d'inventions, et la presse répéta complaisamment ses propos.

Il n'en sortira aucune invention significative. (6)

Actuellement, c'est un *National Historic Site* très visité où perdure le mythe du grand inventeur. Un mythe ne se crée pas pour entrer en concurrence avec le vrai, mais pour faire rêver les hommes à un idéal, et quelques autres raisons plus pragmatiques.

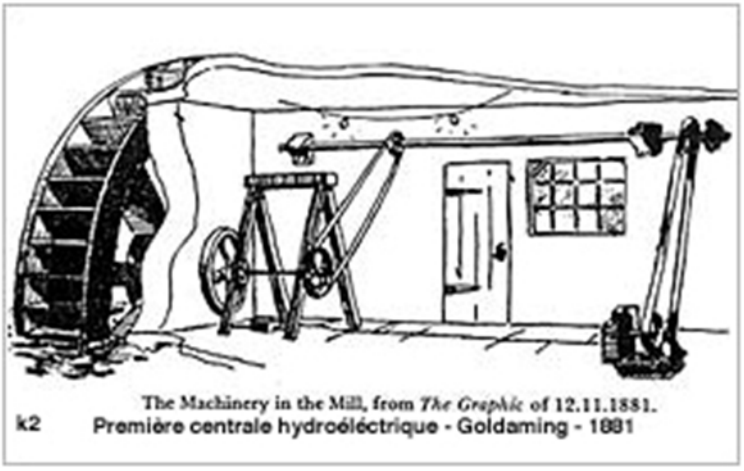
Swan, après l'exposition

Le développement amorcé avant l'exposition se poursuivit en Angleterre sans beaucoup de concurrence au début, si ce n'est quelques éclairages avec des lampes Maxim et Lane Fox. Par exemple l'éclairage des salons du train spécial de Victoria à Brighton, au moyen d'accus Faure.

Fin 1881, un premier théâtre de Londres était éclairé à l'électricité, le *Savoy*, par 1158 lampes, dont 824 sur scène et 114 dans la salle. Elles sont divisées en six groupes, chacun alimenté par un générateur Siemens. Cette première mondiale était importante, parce qu'à l'époque les incendies dramatiques des théâtres éclairés à la chandelle, puis au gaz étaient fréquents (7).

Il faut citer en 1881 un modeste début aux grands développements à venir.

Godalming dans le Surrey fut la première petite ville du monde éclairée par une centrale hydro-électrique (k2). Les propriétaires du moulin, Calder et Barnet, lassés du prix trop élevé du gaz, utilisèrent l'énergie d'une roue hydraulique pour faire tourner un alternateur Siemens et son excitatrice.

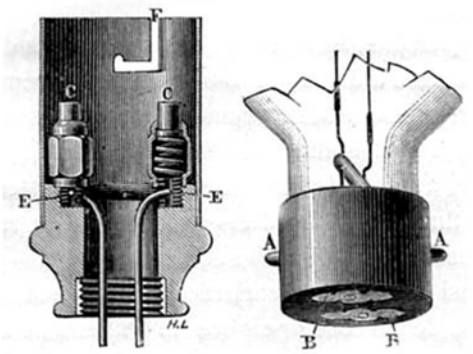


The Machinery in the Mill, from *The Graphic* of 12.11.1881.
k2 Première centrale hydroélectrique - Goldaming - 1881

L'électricité était distribuée dans un premier circuit 250 V, 12 A pour éclairer les rues avec 7 lampes différentielles à arc Siemens, le deuxième éclairait les particuliers avec 34 lampes Swan de 40 V.

L'année suivante l'installation difficile à gérer fut reprise par Siemens, mais en 1884, ce fut le retour au gaz, suite aux contraintes de l'*Electric Act*. L'électricité ne revint qu'en 1904

En 1883, la lampe Swan adopta définitivement le culot, douille à baïonnette de la société Woodhouse et Rawson (l). Ce support a coexisté dans différents pays jusqu'aujourd'hui, un peu plus coûteux que le culot à vis Edison, mais il ne risque pas de se dévisser comme celui-ci, sous l'effet des vibrations dans les chemins de fer ou navires.



l Support Woodhouse et Rawson.

Rapidement, la structure et le capital de la *Swan Electric* s'avèrent insuffisants pour faire face à l'expansion. Une nouvelle société est alors créée le 19 mai 1882, la *Swan United Electric Light Company, Limited,* avec un capital décuplé et la fusion avec la *Crompton Company,* importante fabrique de machines électriques.

Quelques jours après parait dans *The Times,* une lettre des représentants juridiques d'Edison à la *Swan United*, signalant que la lampe Swan était une contrefaçon des brevets Edison. C'était le début prévisible d'une longue suite de procès entre Edison et ses concurrents, jusqu'en 1893.

Personne ne pouvait résister aux juristes de l'homme aux mille brevets (1093). Swan avait pris moins d'une dizaine de brevets sur sa lampe à incandescence, alors qu'Edison en avait 160 à 300, suivant les auteurs et les pays.

Un compromis paraissait souhaitable pour les deux parties, Swan n'était pas un « bagarreur » en affaires ; de même les juristes d'Edison auraient du mal à contredire le fait public que Swan avait près d'un an d'avance dans la mise au point de sa lampe.

La fusion des deux sociétés Edison et Swan se traduisit par la création le 26 octobre 1883, d'*Edison and Swan United Light Company, Ltd.*

Edison ne voulait pas qu'un autre nom que le sien figure dans celui de la société ; il finit par accepter les deux noms, mais exigea que le sien figure en premier, bien que l'apport de la Swan Co soit plus important et surtout que la lampe vendue en Angleterre était celle de Swan avec son filament en coton tressé « parchemintisé », pas le fameux filament en bambou d'Edison. Inévitablement ce fut le nom abrégé *Edison Company* qui apparaissait le plus souvent, parfois l'*Ediswan*. Le monopole de cette société tomba avec le brevet fin 1893. Le prix d'une lampe qui était de 4,7 F est alors descendu à moins de 2 F. et le marché inondé d'une quinzaine de lampes de divers constructeurs pour satisfaire des besoins dépassant le million de lampes par an.

Plus intéressé par la recherche que par les tractations financières, Swan apporta encore une contribution majeure au développement de la lampe à incandescence.

Il inventait, fin 1883, un nouveau filament « *squirted* » : de la nitrocellulose est dissoute dans l'acide acétique, puis le produit est comprimé dans une filière très fine et coagulé dans l'alcool méthylique. Après traitement, le fil est carbonisé et permet d'obtenir un matériau parfaitement homogène, plus uniforme que tous ceux connus dont la section est variable en fonction de la filière. Il permet en particulier d'obtenir des filaments de section très fine pour faire des lampes de faible puissance et à tension élevée (8).

Ce filament au carbone synthétique, breveté, fut ensuite utilisé par tous les fabricants de lampe jusqu'à l'apparition des filaments métalliques, en 1898. Seul Edison refusa de l'adopter jusqu'à la fusion de l'Edison Co en 1892 dans la *General Electric* qu'il ne dirigeait plus.

Maxim, après l'exposition

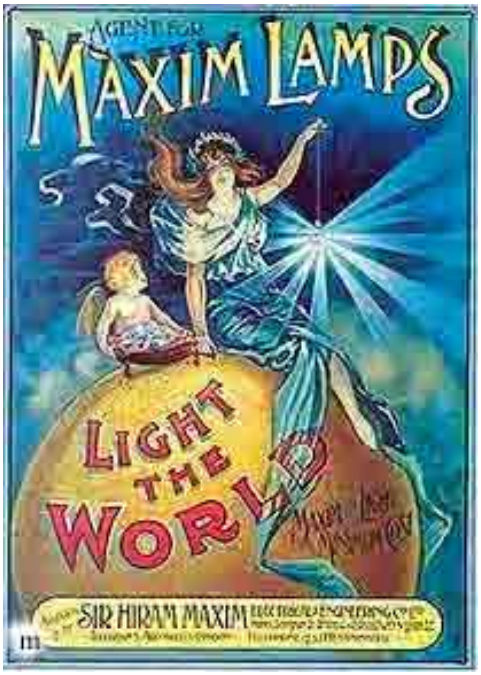
La réussite technique de la lampe Maxim avait été au moins aussi concluante que celles de Swan et Edison, mais le succès d'opinion qui avait suivi était conditionné par la puissante campagne de presse montée par Edison. La lampe Maxim, intégrée dans un système industriel efficace avec même

une supériorité des génératrices, avait de fortes chances d'être un sérieux concurrent d'Edison, aussi bien en Amérique qu'en Europe. C'était sans compter sur l'atout maitre d'Edison, ses juristes dans chaque pays.

Les procès intentés en Amérique furent perdus, l'un des points étant que les dépôts de brevets de Maxim étaient postérieurs à l'installation de lampes Edison sur le vapeur Columbia en mai 1880. Il n'a pas été pris en compte que ces lampes provisoires à filament de papier étaient loin d'être au point : durée faible et irrégulière, rupture aux vibrations.

Maxim quitte alors l'Amérique pour s'installer en Angleterre en 1882 où sa filiale peut rester en activité partielle (m), en attendant l'échéance des brevets Edison en 1893, mais lassé des procédures, il se tourne vers d'autres recherches (9).

Par une certaine ironie de l'histoire, si le nom d'Edison ne figure plus depuis 1892 sur aucune marque de lampes, celui de Maxim, a réussi à traverser le siècle : la société anglaise *Maxim Lamps* fabrique toujours depuis 1879.



Lane fox, après l'exposition

Tant sur le plan financier qu'industriel, Lane Fox ne pouvait guère partager une part du marché de la lampe avec ses trois concurrents. Pourtant il mit au point aussi un système de régulation pour les génératrices et un compteur.

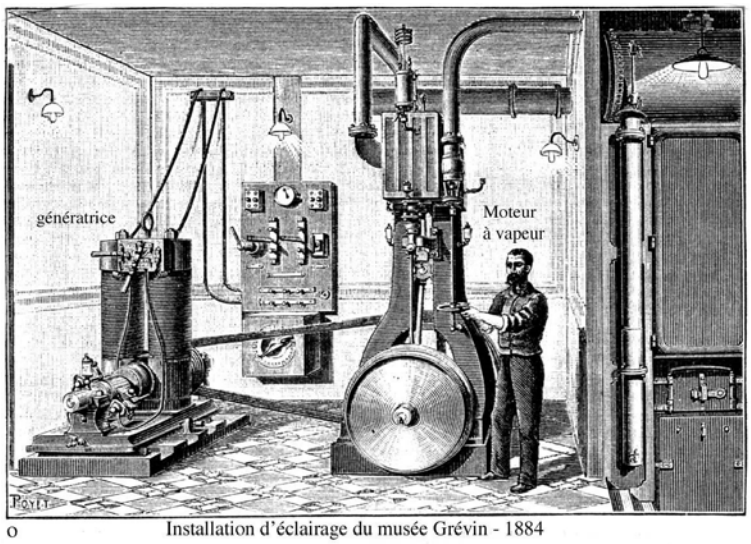
Brush, s'était implanté en Angleterre pour vendre ses installations d'éclairage par arc et cherchait à y ajouter des lampes à incandescence. Il envisagea d'acheter la lampe Lane Fox, mais, après essais, il abandonna en 1883 et prit une licence de la lampe Swan en 1884.

Les seules installations que Lane-Fox parait avoir équipé ont été à Temesvar en Hongrie, 760 lampes alimentées par des machines Brush et à Anvers avec des dynamos Gulcher.

Lane Fox disparut du monde électrique. Inventeur méritant, le petit David « *ne faisait pas le poids* » devant le géant Goliath, en ce premier siècle de notre civilisation industrielle.

Installations d'éclairage et centrales

Les années 1883/84 marquèrent le début de la formidable expansion de l'éclairage électrique, tout au long du xx^{e} siècle. Les générateurs montaient en puissance, soit en courant continu, puis en courant alternatif, préféré pour les lampes à arc.



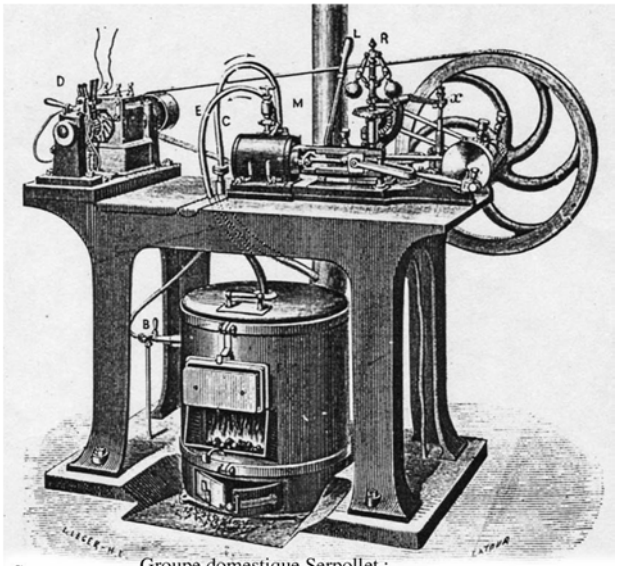
Installation d'éclairage du musée Grévin - 1884

Ils étaient entraînés en majorité par des moteurs à vapeur brûlant du charbon, parfois des moteurs à gaz dans les villes, ou encore hydrauliques hors des villes. D'une façon plus marginale, d'autres vecteurs d'énergie que l'électricité étaient aussi distribués par canalisations, l'air comprimé et même l'air raréfié, le vide partiel. (IV-2) Les petits moteurs qu'ils faisaient tourner pouvaient aussi entraîner des génératrices d'éclairage.

Dans l'exemple (o), l'éclairage du musée Grévin à Paris, on identifie les éléments de l'installation : à droite, les chaudières produisant la vapeur à partir du charbon stocké à côté, puis le moteur à vapeur fonctionnant sous une pression de 10 à 12 atmosphères. Il entraînait par courroie un générateur Edison-Hopkinson dont les deux câbles allaient à un tableau répartissant le courant entre trois ou quatre circuits sous 110 volts.

Dans les villes disposant de gaz, c'était souvent des moteurs à gaz pour les petites puissances, solution plus pratique que le charbon, mais plus couteuse Quand on disposait à proximité d'une chute d'eau, c'était un moteur hydraulique, ancienne roue de moulin ou turbine.

Lorsque l'installation dans un intérieur d'un moteur assez important n'était pas possible, un inventeur C. Serpollet conçut un modèle domestique, pas trop encombrant, une mini-chaudière fournissant la vapeur à un petit moteur à piston entraînant la génératrice (q). Difficile à intégrer dans une maison.



q Groupe domestique Serpollet :
chaudière, moteur à vapeur, générateur électrique

Deux conceptions de production-distribution se sont définies par l'usage :

— les **installations** particulières, (autonomes) publiques ou privées, petites ou grandes, desservant un seul type d'utilisation : immeuble, château, usine, gare, théâtre, hôtel, grand magasin, église (10). Ce furent les plus nombreuses pendant la décennie 1880

— les **stations centrales** vendant l'électricité à nombre d'abonnés d'une zone, d'abord limitée à moins d'un km, puis bien plus loin, lorsque l'on découvrit à partir de 1886, la possibilité de transport du courant alternatif.

Il fallu plus d'une dizaine d'années pour que se dégagent par l'expérience les systèmes de distribution les mieux adaptés. Ce choix suscita des polémiques technico-économiques entre :

– Les deux conducteurs en dérivation sous 110 volts courant continu (Edison au début).

– Systèmes en série, pour monter en tension, continu ou alternatif (Brush - Thomson).

– Système à 3 fils avec commun (Hopkinson-Edison) avec générateurs et lampes en 110 volts presque équivalent à une distribution 220 volts.

– Système à 5 fils.

–Adaptation des générateurs à la charge quasi nulle pendant la journée, soit en installant plusieurs génératrices, activées suivant la charge, soit une batterie d'accumulateurs tampons, chargés dans les creux de consommation.

– Alternatif monophasé avec transformateur (après 1886) 2400/110 volts.

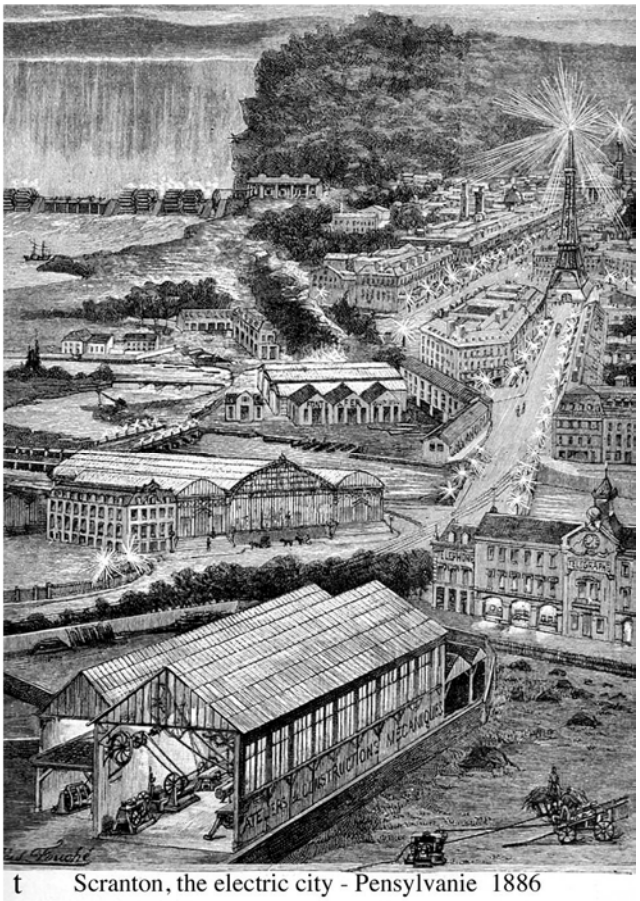
– L'alternatif triphasé ne se généralisa qu'à la fin du siècle.

Les centrales étaient généralement la propriété d'un investisseur privé, mais il lui fallait obtenir une concession des municipalités pour faire passer les conducteurs aériens ou souterrains dans les rues et chemins, en échange il fournissait l'électricité pour les lampes à arc, seule solution pour l'éclairage public. Même l'ampoule, dite de 32 bougies, éclairait sensiblement comme une de nos lampes de 25 W, l'arc équivalait lui à 150, 500 W ou plus, avec un bien meilleur rendement.

En Europe, ce sont les petites villes de province, n'ayant pas d'usine à gaz, qui développèrent les premières centrales. Le lobby du gaz était puissant dans les autres villes et résista des années.

En Amérique, ce ne fut pas le cas, les gaziers comprenant le danger, investissaient eux-mêmes dans l'électricité, d'où l'exceptionnel succès commercial d'Edison, tout au moins avant la généralisation du courant alternatif. En Europe, malgré la solide implantation des filiales Edison à Londres, Paris, Berlin et Rome, les gaziers ne cédèrent qu'en 1888/89.

Entre le nouveau et l'ancien continent, se révélaient de nettes différences entre les mentalités, l'approche et la construction du monde industriel avec l'électricité (11).



t Scranton, the electric city - Pensylvanie 1886

Aux États-Unis

Après les précurseurs Brush, Maxim et quelques autres, assez rapidement absorbés ou éliminés, la puissante locomotive Edison fut, pendant une douzaine d'années, le moteur d'une expansion de l'éclairage électrique plus rapide et bien plus importante qu'en Europe :

– La toute première centrale avait été démarrée par Edison pour éclairer un quartier de Manhattan.

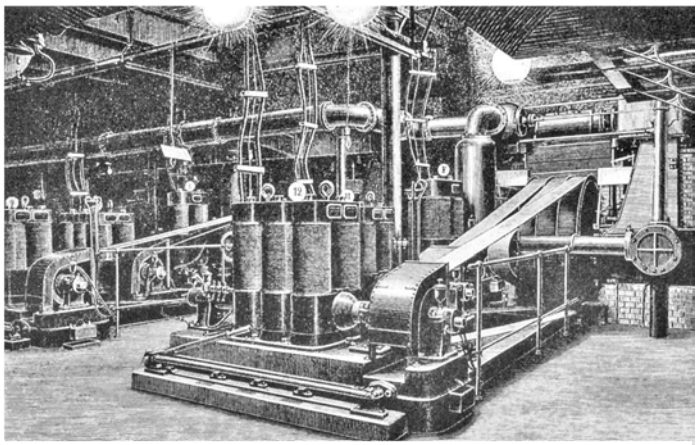
– À Minneapolis, Brush installait la même année, une première centrale hydroélectrique, St Antony.

–La célèbre statue de la Liberté était inaugurée en 1885 avec un puissant éclairage, 5 foyers de 6000 bougies aux angles de fort Wood et 10 autres dans la torche sommitale (s).

s

– En 1885 on recensait 24 centrales pour 160 000 lampes, nécessitant 68 000 ch. L'année suivante, c'étaient 41 centrales. On citait aussi l'exemple de Scranton petite ville de Pennsylvanie comme le modèle d'une ville *tout électrique*, éclairage, ateliers, agriculture, tramway (t), Le graveur de l'image a seulement exagéré la hauteur de la chute de la Susquehanna River alimentant l'usine hydroélectrique.

— En 1890, c'étaient 1500 centrales pour 1 600 000 lampes à incandescence et 127 000 à arc, nécessitant 350 000 ch thermiques ou hydrauliques. Mais la majorité des installations en nombre, mais souvent moins puissantes étaient privées, totalisant 6500 installations autonomes, plus 700 bateaux et 200 tramways.


u Electric power station in Berlin, 1885

En Allemagne

Probablement la nation européenne où l'éclairage électrique s'est développé le plus rapidement. Emil Rathenau créait en 1883 la *Deutsche Edison Gesellschaft.* Il se sépara d'Edison en 1887 et sa société devint l'*Allgemeine Elektricität Gesell-schaft*, AEG, qui sera pendant un siècle le grand concurrent de Siemens.

Cette dernière société développa dès 1882 une lampe à incandescence pour compléter son offre globale avec ses génératrices et ses lampes à arc performantes.

La première grande centrale fut en 1885 *Markgrafenstrasse*, (u) puis *Mauerstrasse* et *Friedrichstrasse*, l'ensemble totalisant en 1889, 36 000 lampes à incandescence et 144 à arc.

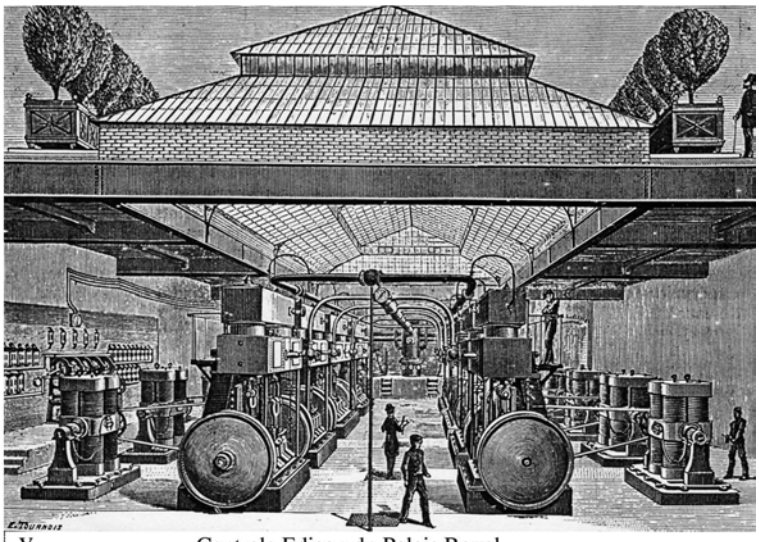
En 1890, il y avait en Allemagne 1590 installations autonomes et 21 centrales.

En France

À la tête du développement initial pour les génératrices, comme pour les lampes à arc, elle se contenta d'utiliser les fabrications étrangères pour la lampe à incandescence. L'une des raisons qui incita Edison à y établir à Ivry sa principale usine de fabrication pour l'Europe.

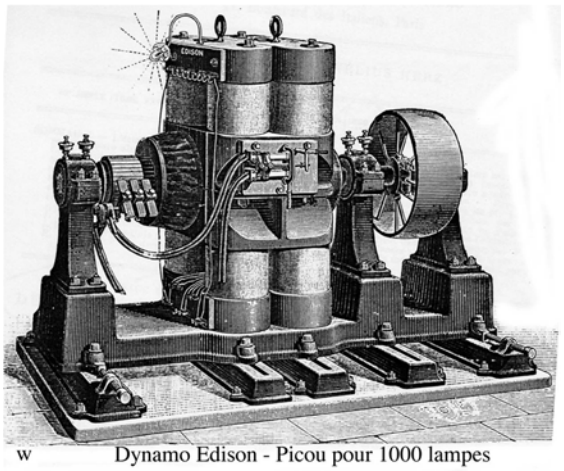
Dans les villes déjà éclairées au gaz, Paris en particulier, l'éclairage électrique à partir de centrales de distribution se heurtait aux privilèges dont bénéficiaient les compagnies gazières, bien représentées dans les conseils municipaux. Cette protection ne cédera qu'en 1888, à l'approche de la grande exposition de 1889, centenaire de la révolution.

Une première station centrale, un modeste prototype, était inaugurée en juin 1887 à la *cité Bergère* par la *Compagnie française d'éclairage électrique* de *Charles Mildé,* sans aucun matériel Edison, cas très particulier. Deux moteurs à vapeur de 60 ch actionnaient chacun deux machines Gramme, du type *supérieur,* distribuant l'électricité par le système 3-fils sous 220/110 volts, desservant 1500 lampes Swan de 10, 16 ou 32 bougies. Le compteur Cauderay à électrodynamomètre, plus pratique que l'électrolytique Edison, facturait le carcel/heure à six centimes, un peu plus cher que le gaz à cinq cents. Une batterie d'accumulateur de 120 éléments compensait la charge en fonction de la mise en service partielle des 4 machines.



V Centrale Edison du Palais Royal

Ce fut la *Cie Continentale Edison* qui construisit, en 1888/89 avec une concession de 20 ans, la première grande centrale pour éclairer tout un ensemble de bâtiments publics, le Théâtre français, les cours et jardins du *Palais Royal*. La centrale, semi enterrée au milieu de la cour d'honneur (v), avait cinq chaudières produisant 12 tonnes de vapeur à l'heure, à 12 kg de pression ; elles alimentaient les huit moteurs Weyher et Richemond entraînant les dynamos de 140 ch, 800 A sous 125 V. C'étaient un nouveau modèle performant étudié par le professeur R.V. Picou en 1885 pour les ateliers Edison d'Ivry, avec un rendement de 96,5%, chiffre sans doute optimiste (w). Une description des éléments de cette centrale typique figure en (12).



w Dynamo Edison - Picou pour 1000 lampes

Finalement, sous la pression de la prochaine exposition de 1889, la ville de Paris accorda en mars 1889 les concessions pour l'éclairage électrique de six secteurs de Paris, à l'intérieur des remparts, pour 18 ans, échéance de celles du gaz.

Ce fut le début d'une belle anarchie de différents systèmes électriques, incompatibles entre eux, qui ne se sont uniformisé pour interconnexion que très lentement,

finalement en 1950. Les différences portaient sur le courant, continu trois ou cinq fils, alternatif, monophasé, diphasé puis triphasé ou bien la fréquence, la tension primaire, seule la tension d'utilisation était 100/110 volts (w2).

Quatre concessions furent accordées dès 1889 :

– La *Compagnie Continentale Edison* - 4 centrales courant continu 3 fils 220/110 V.

– La *Société d'éclairage et de force par l'électricité*, système Deprez, avec une centrale à St Ouen de 700 ch, envoyant son électricité à 7 km sous 2500 V continu à 4 sous-stations la transformant par groupe convertisseur en courant continu 110 V.

– La *Société d'éclairage électrique du secteur de la place Clichy* - une centrale en courant continu à 5 fils, 110/440 V

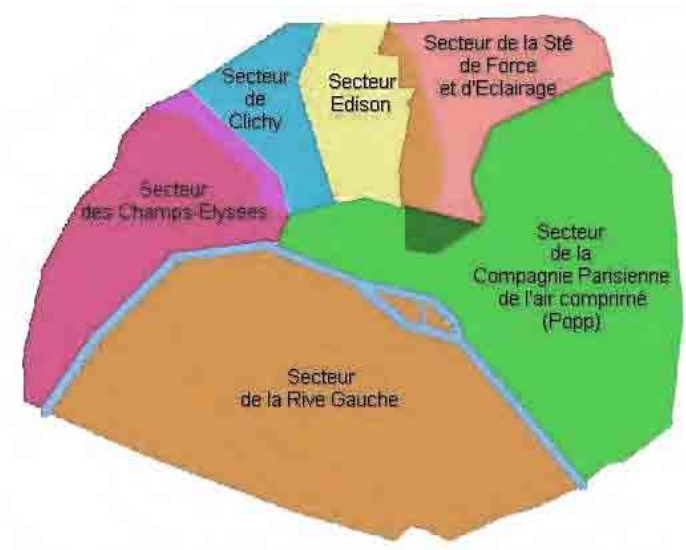
– La *Cie Victor Popp* - courant continu 5 fils 4x110 V. Elle distribuait aussi de l'air comprimé et évolua en *Cie Parisienne de l'air comprimé et d'électricité* (13).

Plus tard, deux autres concessions :

– En 1890, à *Sté Charles Mildé et fils* avec une centrale à Levallois en alternatif 3000 V à 40 Hz, transformé en 110 V dans chaque immeuble. Elle devint ensuite *Cie d'éclairage électrique du secteur des Champs-Élysées.*

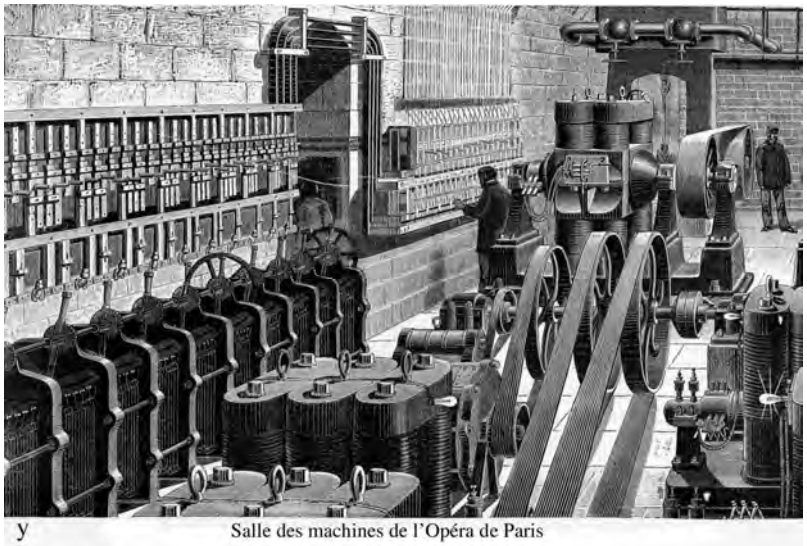
– en 1894, à M. Naze, *Cie électrique du Secteur Rive gauche*, en alternatif comme la précédente.

À ces centrales, il faut ajouter, la *centrale municipale des Halles*, construite par la ville de Paris en 1889 pour expérimenter par elle-même les aspects techniques et économiques de ce nouveau procédé qu'elle concédait ailleurs à d'autres. Équipée de six moteurs à vapeur, entraînant chacun deux génératrices Edison du petit modèle amélioré, elle totalisait 960 ch .



w2 Secteurs de distribution électrique à Paris

Toutes ces centrales ne fournissaient qu'une partie seulement de l'électricité d'éclairage, 29% en 1889, 54% en 1896, le reste l'était par les installations autonomes, mais surtout les ateliers et usines pour 25% (14).



y Salle des machines de l'Opéra de Paris

L'Opéra fut un cas particulier, remarquable par une succession d'essais d'éclairage depuis l'exposition de 1881. La suppression du gaz y fut totale en 1888, après le terrible incendie de l'Opéra Comique, éclairé au gaz, responsable de 200 morts.

Dans la salle des machines (y), équipée par la Continentale Edison, tournaient 4 dynamos 800 A et 8 dynamos 300 A du nouveau modèle Picou, soit au total 950 ch pour 7000 lampes.

À droite, le long du mur, on remarque l'un des premiers systèmes de *jeu d'orgues,* assurant la régulation progressive des lampes de scène.

Le développement de l'éclairage se développa différemment **dans les régions,** d'abord les petites villes n'ayant pas d'usine à gaz.

La première petite ville de France distribuant l'électricité à partir d'une centrale fut Bellegarde sur Rhône en 1884. Dumont construisit un barrage sur la Valserine donnant une chute de 25 m pour faire tourner 2 turbines Girard entraînant des machines Gramme de 130 V. Le coût était de 8 cent./heure pour une lampe de 16 bougies, ou pour éviter un compteur, un forfait de 6 F par mois.

Le démarrage de ces centrales fut lent, 7 centrales en 1886 (z).

VILLES	LAMPES à incandescence.		DYNAMOS.		NATURE force motrice.	NOMBRE chevaux
Bellegarde	800	Edison.	2	Thury.	Eau.	70
Bourganeuf.	110	Woodh.	1	Thury.	Eau.	10
Dijon.	350	Edison.	3	Edison.	Vapeur.	35
La Roche-sur-Foron.	300	Edison.	1	Thury.	Eau.	40
Modane.	170	Edison.	1	Thury.	Eau.	18
Saint-Étienne. . . .	1.500	Edison.	4	Edison.	Vapeur.	190
Tours.	1.400	Woodh et Swan.	2	Siemens.	Vapeur.	100
TOTAL.	4.630		14			463

z Premières centrales en France - 1886

Le mouvement s'accéléra progressivement, 122 en 1889, 255 en 1893**,** pour atteindre 10 ans plus tard, en 1896, 438 centrales, totalisant 46 000 ch, dont 26 000 obtenus à partir de la vapeur, 11 000 de l'hydraulique, 7000 mixtes, 2000 au gaz.

Ces centrales ne représentaient qu'une partie de la puissance totale installée, les installations particulières étaient majoritaires, comme l'indique une statistique de la même année 1886 (za).

Statistique de l'éclairage électrique.

En mai 1886, la statistique de l'éclairage électrique en France pouvait être établie comme il suit :

DÉSIGNATION DES EMPLACEMENTS.	NOMBRE d'installations.	NOMBRE de lampes à arc.	NOMBRE de lampes à incandescence.
Voies publiques	10	108	140
Édifices publics.	5	»	1.487
Théâtres.	14	324	3.244
Navires.	25	52	5.947
Maisons particulières. .	28	98	1.594
Magasins, cafés.	49	762	3.932
Musées.	3	2	800
Ateliers, usines, etc. .	895	4.163	33.537
Chantiers de travaux publics	8	61	10
Stations centrales. . . .	7	»	4.630
Appareils photo-électriques.	»	300	»
	1.044	5.880	55.321

za

Leur architecture était simple, comme celle de la petite centrale d'Allemont, en Dauphiné (zb), rare patrimoine industriel à avoir encore conservé toutes ses machines, turbine, régulateur, alternateur.

zb Centrale hydraulique d'Allemont - 1905

Dans tous les pays, l'importante population agricole dispersée dans les campagnes, éloignée de toute centrale, n'avait pas accès aux bienfaits de l'éclairage électrique. La lampe à pétrole apporta une amélioration relative sur la lampe à huile à partir des années 1875. Le courant alternatif, transportable au loin, apportait la solution technique, mais guère rentable. Ce sont les états qui prirent en charge le plus souvent les frais de l'électrification rurale, dans la première moitié du XX^{e} siècle. De longs kilomètres pour des fermes dispersées et à faible consommation.

En Angleterre

Les installations particulières se développèrent comme dans le reste de l'Europe, favorisées par une lampe à incandescence de construction nationale, Swan devenue Ediswan et des constructeurs de génératrices, Siemens Brothers, Gordon, Crompton.

Pour les centrales, la situation fut beaucoup plus difficile. À la suite de spéculations dans l'industrie électrique naissante et surtout de l'opposition des gaziers, le Parlement vota en 1882 l'*Electric Act*, règlement léonin applicable à toute installation de distribution électrique. Cependant, quelques centrales urbaines à courant continu furent installées. Quant à la première mondiale en courant alternatif, celle de *Grosvenor Gallery*, elle fut démarrée par la *London Electricity Supply Corporation dès* 1884, avec le nouveau système, de générateurs secondaires du français Gaulard. Elle distribuait l'électricité, produite par les machines Siemens, à 3000 lampes jusqu'à 14 km, par 5 circuits, sous la tension de 2400 V, transformée près de l'utilisateur à 110 V.

Ce n'est qu'après une réduction, en 1888, des contraintes commerciales et techniques imposées aux électriciens que les centrales se développèrent. L'évènement fut la construction démarrée en 1888 par de Ferranti, d'une centrale gigantesque à *Deptford*, dans la banlieue de Londres. Cette prouesse technique stupéfia même les Américains : tension de 5000 V puis 10 000 V, puissance de 3000 ch puis 20 000 ch (IV-2).

En Italie

En 1885, la Société italienne Edison construisit à Milan une importante centrale pour 10 000 lampes à incandescence et 350 lampes à arc Thomson-Houston. Les 10 machines étaient encore le modèle Jumbo du début.

En 1887, Gaulard avec l'appui de Ferraris équipait à Tivoli une centrale hydraulique transmettant son courant alternatif à 30 km, jusqu'à Rome. Son concurrent pour le courant alternatif, l'Autrichien Ganz, créait à Rome en 1889 une centrale de 9000 lampes.

Autres pays européens

L'éclairage électrique y suivit sensiblement le même développement. À remarquer la Suisse, que ses abondantes ressources hydrauliques ont permis d'équiper 18 centrales en 1890, sous la direction de l'ingénieur *Thury*, dont la compétence était réputée. Ses machines performantes à 3 paires de pôles inducteurs étaient caractéristique.

La force motrice

Dans ce panorama de la première application de l'électricité-énergie, n'apparaît pas l'idée qui nous vient aussitôt à l'esprit aujourd'hui, que les gens devaient profiter de cette électricité devenue disponible, pour faire autre chose que de l'éclairage, de la *force motrice*, des moteurs

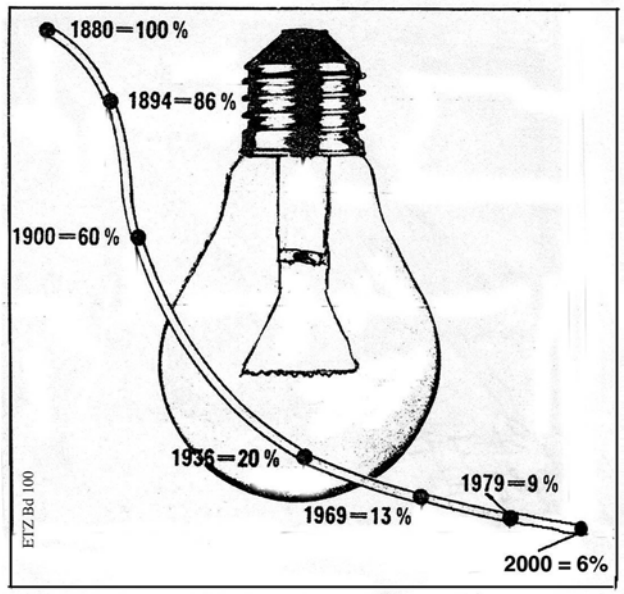
En fait, l'utilisation de l'électricité, force motrice, ne progressa que lentement. En 1896, l'ensemble des six sociétés alimentant les secteurs de Paris avaient une puissance installée de 10 900 kW ; elles alimentaient 454 567 lampes totalisant 16 000 kW et 154 moteurs totalisant seulement 331 kW.

C'était moins le cas des installations autonomes des usines, qui s'équipaient lentement des premières machines à moteur électrique, pour remplacer l'air comprimé, vecteur d'énergie simple et économique.

Le diagramme (zd) est significatif en comparant les deux extrêmes, la consommation d'électricité pour l'éclairage passe de 86% du total en 1894 à 6% en 2000.

L'électricité était très coûteuse au début. Presque incontournable pour l'éclairage, on lui préféra longtemps pour *la force* les autres sources disponibles : l'homme**,** l'animal, la vapeur, les forces naturelles, eau, vent. Pour les courtes distances, c'était l'air comprimé

En se rapportant au salaire horaire de base à chaque époque, le manœuvre de 1898 qui gagnait 0,4 F par heure, payait *un sou par jour* sa lampe de 10 bougies, ce qui représentait sept minutes de travail. En 1998, un ouvrier au SMIC éclaire sa lampe avec un temps de travail de 12 secondes, soit 35 fois moins.



Part de l'éclairage dans la consommation globale

Mais un avantage majeur de l'énergie électrique allait se révéler, le *transport de la force* loin de son lieu de production. Le chapitre IV-2 y est consacré

Vers la lampe à incandescence moderne

Après l'exposition plusieurs nouvelles lampes sont rapidement apparues, évitant les brevets Edison par leur construction ou la législation locale : Siemens et Muller en Allemagne, Cruto en Italie, Gérard en Belgique. D'autres suivirent, surtout après 1893, fin de validité du brevet Edison.

Elles étaient sensiblement comparables si ce n'était la fabrication de leur filament de carbone, ce qui limitait leur puissance à 8 ou 16 bougies. La bougie, dite décimale, étant l'unité de flux lumineux, adoptée après des années de discussions, elle équivalait pratiquement à la bougie anglaise, candle, soit 1/10 de carcel.

Leur consommation était élevée, 4 à 5 watts par bougie pour une durée de vie normale de 1000 heures, réduite à 3 à 4 W/bougie en survoltant un peu la lampe, ce qui réduisait la durée de vie à 400 heures. (15) Le *watt*, nouvelle unité de puissance devant remplacer ultérieurement le cheval-vapeur, ch, fut adopté avec le *joule*, unité de travail, au Congrès international réuni à l'exposition de 1889.

Les objectifs de recherches étaient d'abord d'augmenter la puissance des lampes, monter à 32 bougies et plus pour essayer de remplacer les lampes à arc, d'autre part réduire la consommation spécifique, c'est-à-dire obtenir un meilleur rendement de la transformation d'énergie électrique en énergie lumineuse.

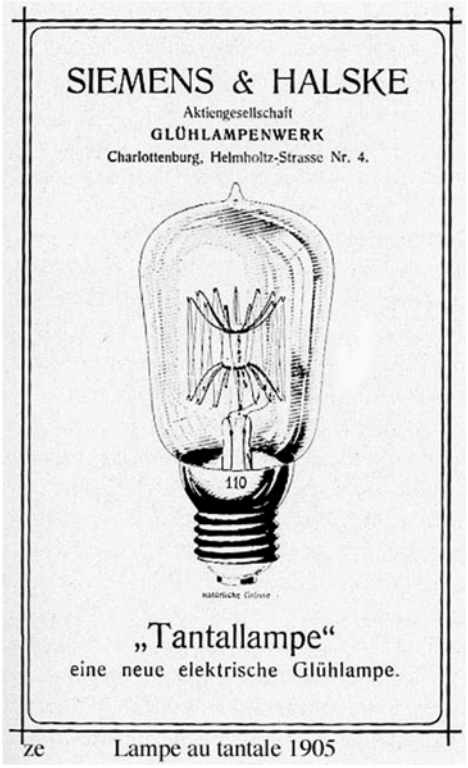
Deux pistes furent suivies, accroître la température du filament puis remplacer le vide par un gaz.

On chercha d'abord à améliorer le filament de carbone suivant le technique initiée par Swan, du carbone obtenu par synthèse à partir de la cellulose.

Une autre solution apparut en 1898 à la suite des travaux du professeur Walter de Göttingen, qui constata que certains oxydes métalliques, magnésie, chaux, zircone, portés à très haute température devenaient conducteurs, la température était ensuite maintenue par le passage du courant. Sur ce principe, Nernst construisit une lampe qui eut un certain succès, ne consommait que 2,5 watt/bougie mais trop complexe.

La solution du **filament métallique** fut reprise vers 1902 par Carl Auer avec l'osmium. Il obtenait 2,5 watt/bougie, mais le filament était fragile.

Siemens s'orienta vers le **tantale**, obtenu au four à arc à partir de l'oxyde. Il fallait un filament de grande longueur monté alors en zigzag entre deux étoiles de verre. Ce fut un succès avec environ 2,5 watt/bougie et des puissances de lampes montant à 50 bougies. (ze)



ze Lampe au tantale 1905

Ce fut **le tungstène** qui s'avéra la meilleure solution car fondant à 3300 °C, il pouvait fonctionner en permanence à 2200°. L'Autrichien Franz Hanaman réalisait en 1906 un filament en poudre de tungstène agglomérée, obtenu à partir de l'oxyde de wolframite. La consommation tombait à moins de 1,8 watt/bougie. Mais le tungstène s'évaporait, noircissait la lampe et s'amincissant fondait.

Finalement, William D. Coolidge réussit à obtenir du tungstène ductile en 1910 au laboratoire Général Electric de Senectady. Dès 1912 des lampes à filaments spiralés de 25 à 150 W étaient commercialisées.

Avec un remplissage d'azote, puis d'argon, Irving Langmuir obtenait des consommations de 1 watt/bougie.

D'autres améliorations apparurent, tel le filament à double spirale en 1934, le krypton en 1935, mais commercialisé seulement en 1968

John Waring avait constaté en 1894 que la vapeur de brome évitait le noircissement. Aussi le dernier perfectionnement fut en 1959, la **lampe halogène**, remplie avec des vapeurs d'halogénures, brome ou iode.

Elles permettent au tungstène évaporé de se redéposer sur le filament au lieu de noircir le verre, celui-ci est monté en température à plus de 2500°C, l'ampoule beaucoup plus petite, chauffant fortement doit alors être en quartz. La durée de vie est portée à 2000 h et l'efficacité lumineuse accrue de 30%.

L'efficacité lumineuse s'exprime maintenant en lumen par watt. L'ancienne lampe à incandescence à filament de carbone nécessitait 4W/bougie, ce qui équivaut approximativement à 3 lumen/W. Une lampe ordinaire actuelle émet environ 12 lumen/watt, soit 4 fois mieux. Ce qui en fait néanmoins le mode actuel d'éclairage électrique de plus faible efficacité.

Rappelons par comparaison : en chiffrant à 1 l'incandescence ordinaire, l'ampoule halogène a une efficacité moyenne de 1,4, la lampe fluocompact de 5, le tube fluorescent de 6, la lampe à décharge au sodium de 8 à 16.

Les diodes électroluminescentes LED paraissent encore meilleures.

Compléments

1-- *La Lumière Edison,* imprimerie A. Lahure, Paris, 1882.

Extraits :- Le *Temps* du 28 août, soirée de la visite de Gambetta - *Le grand attrait de la soirée était au fond des galeries, dans les vastes salles où, grâce au génie du solitaire de Menlo-Park, la lumière électrique s'est disciplinée…Tout le monde hier se pressait chez Edison ; on regardait avec curiosité ces arcs lumineux, brillants sous leur globe de verre et jetant une douce lumière sur les draperies des Muses de Baudry…*

La contradiction n'est plus possible aujourd'hui. Edison, il est de toute justice de le reconnaître, a réalisé l'éclairage domestique par l'électricité.

- *La* ***République française*** du 4 sept.*…Sur ce terrain, fort exploité depuis des années déjà, Edison prit aussitôt le taureau par les cornes en se posant le problème dans toute son étendue et avec les plus extrêmes difficultés. C'est une solution complète qu'il poursuit : faire tout ce que fait le gaz - en fournissant une lumière d'intensité constante, facilement maniable…mais le faire mieux que le gaz, en donnant une lumière dépourvue de toute odeur, qui n'émet aucune vapeur nuisible à la santé…*

- Les *Débats* du 9 sept. - *La lumière Edison pénètre non seulement où va le gaz, mais où il n'a jamais pu aller, dans les appartements élégants, dans les salons où elle remplace sur les lustres et sur les candélabres, l'antique bougie et ses inconvénients*

- Les *Débats* du 22 oct.- le chroniqueur scientifique Henri de Parville y livre un long article et ses calculs démontrant l'économie de l'incandescence par rapport au gaz, bien que plus chère cependant que la lampe à arc.

- La *France* du 30 oct. la comparaison qualitative avec le gaz est détaillée. *…Dès maintenant, le grand ensemble que constitue le système Edison est absolument complet dans toutes ses parties, et il paraît certain qu'il a désormais atteint le plus haut degré de simplicité, d'économie, de praticabilité et de confortable qu'on puisse désirer.*

- Le *Figaro* du 29 oct. se livre à une variante du conte des Mille et une Nuits : *Edison ou la lampe merveilleuse,* qu'il termine ainsi :

… Pour l'éclairage, il faut de la lumière - Qu'est-ce qui nous en procure, actuellement ? - Ce sont les usines à gaz - Or l'usine à gaz nous envoie la lumière, c'est vrai, mais avec une foule de choses infectes, nauséabondes, méphitiques, qu'elle devrait bien garder pour elle - L'idéal, ce serait de laisser tous ces produits malsains, là-bas, à l'usine, de ne donner aux abonnés que la lumière - Avec l'électricité nous dit Edison, je fais cela - Dans l'usine, dans mes machines à vapeur, je brûle la houille, et tous ses produits infects s'en vont en fumée - …Voilà l'idée originale, et par sa forme, et par le fond, si admirablement formulée et réalisée par Edison …

- *L'Evènement* du 23 oct s'intéresse à la sécurité dans les lieux publics - *…C'est aussi au savant américain que nous devons de voir les dangers d'explosion supprimés. S'il se produit des fuites d'électricité, elles ne dégagent aucune mauvaise odeur et l'on peut en approcher une chandelle sans crainte de voir la conduite vous sauter au visage…*

La brochure se termine par une dizaine de témoignages adressés par les nouveaux clients très satisfaits

2 - ROBERT FOX - *Edison et la presse française à l'exposition internationale d'électricité de 1881,* dans diverses publications dont *Un siècle d'électricité dans le monde,* PUF, Paris,1987 et 1er colloque de l'Association pour l'Histoire de l'Electricité en France, AHEF.

3 - HEINRICH GÖBEL **-** DR H. BECKMANN, *die Erste elektrische Glühlampe,* ETZ H4, 7/48, 23/11/1923. ETZ, 07/1710, 21/11/1929, p.17. ETZ H.41, 10/10/1929. W. KÔHLER, *100 Jahre elektrische Glühlampe, Göbel - Swan - Edison,* ETZ b, Bd 6, 1954, S.313/317. ALFRED WARNER, *Heinrich Göbel zur 160 Geburtstages am 20 april 1978,* ETZ-a, Bd 99,1978, H.4, p.248.

4 - La **mondialisation** à l'époque n'avait pas les caractères de celle actuelle. On ne s'implantait pas dans un pays lointain, parce qu'il permettait de fabriquer moins cher, mais simplement parce qu'il était loin. Le transport des marchandises et des personnes était lent et très onéreux par mer, comme sur terre par rail, très lent par route. L'information d'affaires circulait essentiellement par courrier, ou télégraphe, pas encore par téléphone, ni internet.

5 - La ***Général Electric*** se partagera pendant près d'un siècle l'ensemble des industries électriques américaines avec son presque unique concurrent, la *Westinghouse Electric Company.*

C'est aujourd'hui la 2e plus importante société américaine. Elle est présente au-delà du domaine électrique en fabriquant la majorité des réacteurs d'avion, comme l'indique son logo, visible sur tous les tarmacs d'aéroport, une petite spirale peinte sur l'axe des réacteurs, aussi bien de Boeing que d'Airbus.

6 – Inventions d'Edison à West Orange

La seule invention intéressante faite dans ce laboratoire fut le **Kinétoscope**, précurseur du cinéma. Mieux que d'autres systèmes de l'époque, l'appareil permettait à une seule personne de visualiser un effet animé pendant quelques instants. Conçu par William Dickson, les brevets furent néanmoins pris par Edison. Le principe ne permettait pas de développer un projecteur pour plusieurs personnes, cependant l'innovation comportait un élément repris par Louis Lumière, un film souple de celluloïd conçu par George Eastman (Kodak), de 35 mm avec des perforations pour son entraînement.

Cet entraînement, continu dans le kinétoscope, devint saccadé avec arrêt sur chaque image et occultation par croix de Malte dans le cinéma inventé par Lumière en 1894.

7 - Incendies de théâtres. 1811, Richmond, 78 morts - 1836, Saint Petersbourg, 800 morts - Canton (Chine), 1670 morts - 1845, Québec, 200 morts - 1847, Carlsruhe, 63 morts - 1872 Tien-Tsin, 600 morts - 1876, Brooklyn, 283 morts, 1880, Nice, 70 morts - 1881, Vienne, 500 morts - 1886, Opéra-comique, 200 morts…L'électricité apporta aux théâtres une sécurité aussi efficace qu'aux chemins de fer pour leur signalisation.

8 - Le ***squirted filament*** de cellulose, inventé par Swan, servit à son épouse de fil pour tricoter du tissu, l'ancêtre de la *soie artificielle.* Swan, peut être fatigué par l'âge, transmis à ses deux fidèles collaborateurs dans le développement de la lampe, Stearn et Topham, le soin de développer cette invention du textile artificiel, dénommé au début rayonne, viscose ou fibranne, l'une des plus importantes des temps modernes.

Lorsque nous enfilons l'un de ces nombreux vêtements en tissu synthétique, songeons que leur origine remonte à la lampe électrique de Swan.

Merci à l'électricité de nous avoir éclairé, mais aussi indirectement habillé.

9 - Hiram Maxim - Après l'exposition de 1881, Maxim émigra à Londres où il transféra ses activités électriques. Découragé par les procès d'Edison il se tourna vers d'autres inventions et reste plus célèbre pour celle du fusil automatique à répétition, puis de la mitrailleuse, qui équipa l'armée britannique à partir de 1895. L'idée était d'utiliser le choc de recul du canon d'un fusil pour éjecter la douille et réarmer l'arme très rapidement. On sait le massacre à partir de la guerre de 1914, que provoqua cette nouvelle arme de destruction massive, mais diffuse dans le temps et l'espace ; au moins 10 fois plus de morts que la bombe atomique 30 ans plus tard, mais étalés sur quatre années.

Ensuite il s'illustra dans les débuts de l'aviation en construisant plusieurs modèles qui ont réussi à voler. C'était un inventeur très éclectique.

10 - L'éclairage électrique **dans les églises** était-il compatible avec les Écritures ? La réponse que l'on souhaitait positive a été trouvée dans le " *Fiat Lux* " de la Bible. En 1892, l'évêque de Poitiers l'inaugurait dans sa paroisse Sainte Philomène avec une nouvelle prière, *Benedictio machinae ad excitandum lucem electricam.*

11- Contraste **Amérique - Europe**

Il est résumé dans ce compte-rendu d'une mission du ministère du Commerce (9/1893) :

Disons tout d'abord que nous n'avons pas rencontré en Amérique les nouveautés que notre imagination, sur la foi d'une réclame préalable fortement chauffée, nous faisait entrevoir. Nous n'avons trouvé de réellement merveilleux que la quantité jointe à la grandeur du matériel et des exploitations, et surtout l'esprit d'entreprise..…

En France, pays très dense, la main-d'œuvre est abondante et habile, les capitaux sont répartis, pour un même secteur industriel, entre nombre de sociétés. Les éléments des problèmes à traiter sont nombreux et tellement variés, que chaque cas conduit à une solution particulière. Ce manque d'unités entraîne la création de types dont la multiplicité même entrave toute fabrication intensive en grand nombre.

…En Amérique (États-Unis), pays très vaste où la population quoique nombreuse est peu dense, les conditions sont tout autres : La main-d'œuvre est rare, par suite très coûteuse - Des capitaux énormes sont concentrés dans un petit nombre de mains - Enfin les systèmes sont peu nombreux et les solutions sont uniformes. L'exemple le plus frappant est celui de la construction des ponts, établis tous avec le même système de poutres, mais en nombre variable suivant la portée …la presque totalité des voies de tramways avec un écartement des rails constant, si bien que le matériel roulant est interchangeable.

…En Amérique, chaque branche d'industrie constituera bientôt un véritable monopole, les usines et les petites sociétés venant l'une après l'autre, séduites ou tuées par la puissance du dollar, se fondent en un vaste consortium, habilement machiné par de hardis financiers. ainsi pour le téléphone, l'American Bell Telephone Co, pour le télégraphe, la Western Union Telegraph Co, pour

l'électricité, la Général Electric Co qui peut livrer 300 moteurs de Railways par mois, et son adversaire la Westinghouse Electric Co, la Western Co pour les câbles, Baldwin qui peut livrer trois locomotives par jour, Pullman pour les wagons etc.

…Il faut aussi remarquer que la législation des brevets, si rigoureuse pour la protection de l'inventeur, encourage l'esprit inventif des praticiens.

En tenant compte du sens commercial si développé chez les Américains, du riche budget qu'ils accordent à la publicité toujours confiée à des spécialistes expérimentés, on comprendra sans peine les raisons du développement industriel de leur pays.… Il est curieux de rapporter l'avis des Américains eux-mêmes que nous empruntons à un " Pocket Handbook " pour leurs commerciaux en voyage : " En Europe la routine indolente prévaut contre les idées nouvelles en électricité qui se propagent chez nous à une vitesse vraiment électrique ; l'industrie européenne est peu audacieuse, les remuants étant tous dans le commerce.

Par contre, quand l'Europe entreprend une affaire électrique, télégraphe, téléphone, lumière ou transport d'énergie, elle construit et organise avec solidité, magnificence, comme s'il s'agissait de chemins de fer stratégiques.…En résumé dans les contrées nouvelles : impulsion, vitesse, construction et administration pour le présent. Dans le vieux monde : routine, solidité, construction et administration pour l'avenir. "

Sur chaque nouveauté scientifique, technique ou industrielle, alors que de ce coté de l'Atlantique on ergote si l'on la fera ou ne la fera pas, les Américains se préparent, avec l'activité qui leur est propre, à de hardies applications, comptant sur la pratique pour mettre les difficultés en évidence et leur audace inventive pour les vaincre.

Sur ce dernier point, un siècle plus tard, les États-Unis ont peu changé, alors que le mouvement ultra sécuritaire français a fait inclure dans la constitution " le principe de précaution ", à l'opposé du comportement américain. Nos héritiers jugeront dans quelques décennies, si l'arrêt souhaité de l'électricité nucléaire, des O.G.M., des nanotechnologies et autres développements, toujours à risques, étaient justifiés ou néfastes.

Il est à remarquer que les rapports des industriels européens revenant d'Amérique pendant *les 30 glorieuses* ressemblaient encore un peu à ce rapport de 1893.

12- La **centrale Edison du Palais Royal** est bien décrite dans *La Lumière électrique* du 2/02/1889, p. 201/214, accessible sur l'URL cnum. cnam.fr

13 - L'**air comprimé** est comme l'électricité à la fois un vecteur d'énergie (mécanique) et d'information, qui a été exploité avant même l'électricité, a été longtemps utilisé et réapparaîtra en raison ses qualités : simplicité, sûreté, transport à courtes distances de quelques km, propreté et en particulier de son stockage simple et sûr, mais encombrant.

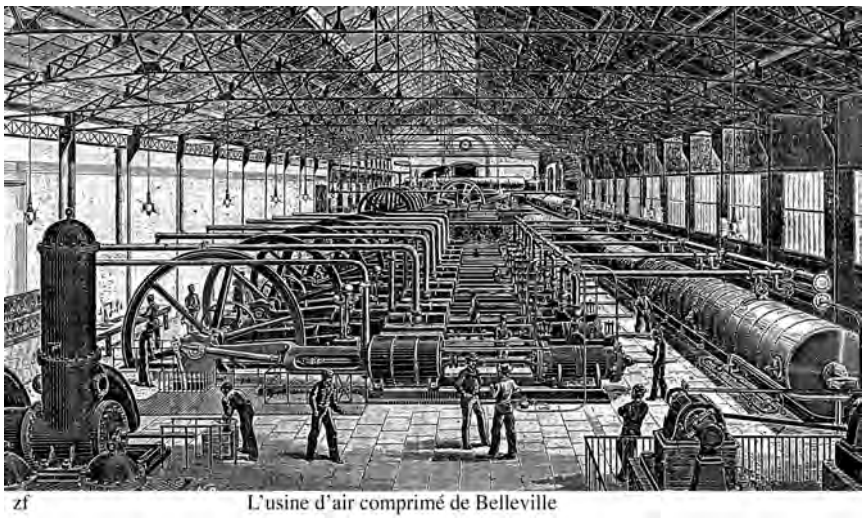
Cependant l'air comprimé a un inconvénient incontournable, le mauvais rendement du compresseur, environ 50 à 60%, qui fabrique de la chaleur en principe inutile – on l'améliore en le refroidissant. Le moteur a lui aussi un médiocre rendement de 40%, il fabrique du froid – on l'améliore en le réchauffant. Le rendement global se situe vers 40%.

En 1879 l'ingénieur Autrichien Victor Popp, installé à Paris, crée la *Cie des horloges pneumatiques* de son invention. Elle fait marcher avec précision des centaines, puis des milliers d'horloges par un réseau de canalisations d'air à 5 kg de pression. En 1887 il lance la distribution d'air comprimé pour alimenter des moteurs simples dans les ateliers. Il obtient en 1889 la concession de distribution d'électricité dans un large secteur de l'Est parisien, en parallèle avec l'air comprimé et regroupe ses activités dans la *Cie parisienne de l'air comprimé et d'électricité* qui installa deux usines de production (zf). En 1891 une nouvelle usine de production d'air comprimé est mise en service, quai de la gare. Elle alimentera avec 4 groupes de 2000 CV, jusqu'en 1927, des milliers d'horloges, les ascenseurs hydrauliques, le réseau de transmission de courrier par tubes pneumatiques, des milliers d'abonnés à la force motrice.

La SUDAC reprend ces activités en 1973, jusqu'en 1994 où la ville de Paris supprime sa concession pour les canalisations circulant par les égouts, le métro.

Un témoin de cette activité, l'usine de 1891 existe toujours, réaménagée en École d'architecture.

L'air comprimé a été utilisé pour la locomotion, le tramway système Mekarski en 1879 ; mais pour des véhicules plus légers, l'automobile, l'autonomie est insuffisante et le volume du réservoir une gêne.



zf L'usine d'air comprimé de Belleville

Une application récente a été d'utiliser son inconvénient, le refroidissement à la détente, comme un avantage. Ce sont les becs de fabrication de neige artificielle qui diffusent sur les pistes de ski de l'air comprimé saturé d'eau, se transformant en neige, même un peu au dessus de 0°C.

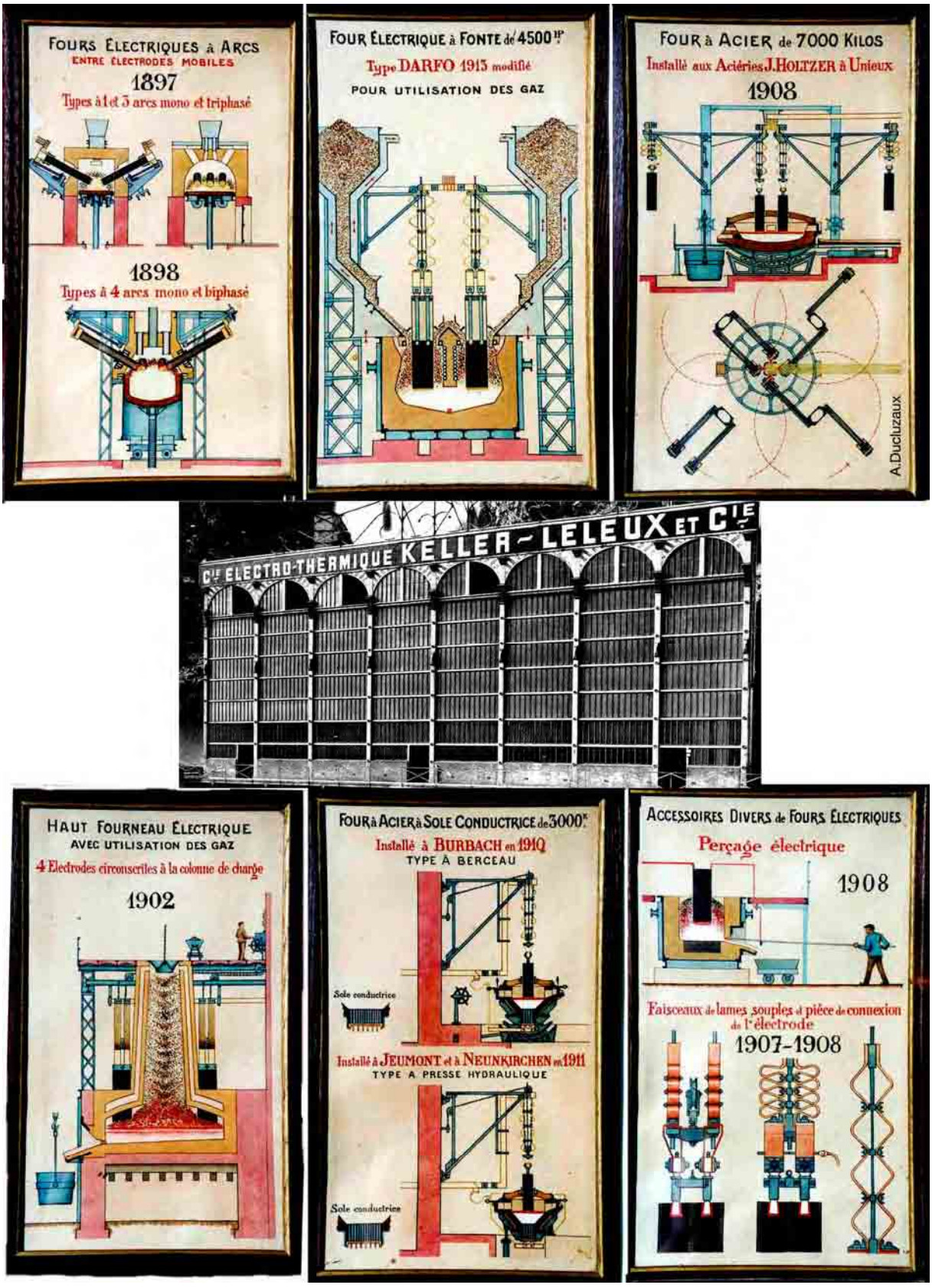
14- Sur l'électrification de l'éclairage à Paris, on peut se reporter à : *La difficile conquête d'une capitale : l'**énergie électrique à Paris** entre 1878 et 1907,* Alain Bertrand, Histoire, économie et société, 1985, n°4, p. 369/395.

15 - Le **watt** caractérise aussi la puissance lumineuse d'une lampe à incandescence depuis les années 1940 parce que celle-ci ne consommait plus que 1 W par bougie avec le filament de tungstène. On a alors assimilé la puissance lumineuse avec la puissance électrique, cas particulier de la lampe tungstène normale. Ce n'était déjà pas valable avec les lampes à vapeur de mercure ou de sodium et les tubes fluorescents, ayant un bien meilleur rendement. Depuis les années 1990, cela devient très gênant avec la large diffusion des lampes fluocompact dont la puissance lumineuse est indiquée comme " équivalente à une lampe tungstène 4 à 5 fois moins puissante en watts"

Il est urgent que l'Europe définisse une **unité d'intensité lumineuse** indépendante de sa puissance électrique en watt. Par exemple revenir au lumen ou équivalent. Les habitudes sont beaucoup plus lentes à modifier que l'évolution technique

.

??



Fours Keller à Livet en Romanche

6 - ÉLECTROCHIMIE – ÉLECTROMÉTALLURGIE

Le berceau dans lequel était née l'électricité à Come, en 1799, la pile, reposait sur une réaction électrochimique, l'oxydation du zinc, que son découvreur Volta ne pouvait guère comprendre.

Un mois plus tard, à Londres, Nicholson et Carlisle, découvraient que le courant de la pile de Volta décomposait l'eau en ses deux éléments, connus depuis Lavoisier, le gaz tonnant (hydrogène) et l'air vital (oxygène).

Cette deuxième découverte, assez rapide et simple, mais fondamentale, ouvrait un nouveau domaine, l'interaction entre la chimie et l'électricité, l'électrochimie.

Sur le plan théorique, c'était une avancée significative pour mieux comprendre la constitution de la matière et des corps, composés de corps simples. La compréhension complète attendra la découverte de l'électron, puis le modèle atomique de Bohr.

Sur le plan pratique l'électrochimie ouvrait nombre d'applications, d'abord à basse température avec les piles, puis à haute température avec des générateurs plus puissants

Humphry Davy ne se trompait pas en déclarant à la Royal Society« l'affinité chimique n'est autre que l'électricité ». Prédiction que Bohr confirma un siècle plus tard, en 1911.

Rien d'étonnant donc, à ce que les premières applications de l'électricité soient dans le domaine de l'électrochimie.

– Jusqu'aux années 1885, les applications concernaient **l'électrochimie à basse température,** avec les faibles puissances disponibles, les piles où des machines artisanales.

– Les fortes puissances électriques, devenues accessibles à la fin du siècle, ont amorcé le développement de **l'électrochimie à haute température,** et en parallèle, le four électrique amorçait le développement de **l'électrométallurgie**. Ces nouvelles industries allaient permettre l'élaboration de l'acier et ses multiples alliages dans ces puissants fours à arc, ainsi que l'aluminium dans des cuves d'électrolyse à haute température fonctionnant avec de très fortes intensités.

Simultanément, ces puissances électriques allaient permettre d'obtenir par électrolyse à température normale d'importantes quantités de soude, chlore, chlorate, et toutes matières de base pour d'autres produits.

ÉLECTROCHIMIE avec de faibles puissances électriques

La faible intensité générée par les piles ou la première génération de machines permit pendant 80 ans le développement d'une électrochimie à la température normale.

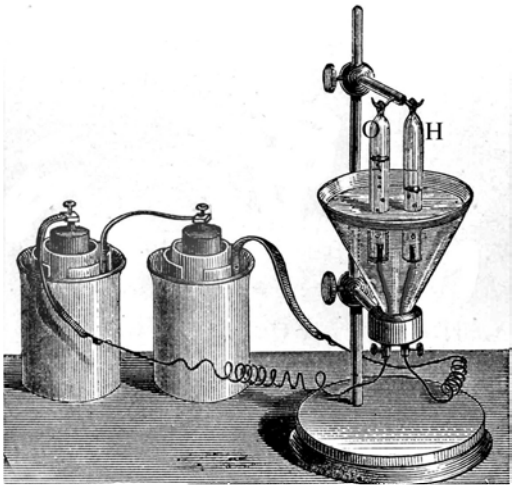
L'électrolyse

Suivant un effet de réversibilité, l'électricité créée par la combinaison de deux corps simples dans la pile, pouvait inversement dissocier des corps composés en éléments simples. L'une des conditions

était la solubilité aqueuse de ces corps composés. Avec ce nouveau moyen, les chimistes firent des progrès rapides dans la connaissance de la matière.

C'est en Angleterre que les explorations de cette nouvelle chimie par l'électricité furent initiées par Nicholson et Davy qui publiaient en 1806 "*Mode d'action chimique de l'électricité*", suivis par Berzélius en Suède, Gay-Lussac et Thénard en France, Carlo Mateucci en Italie. L'électrolyse révèlait que les alcalis, potasse et soude n'étaient pas des corps simples comme on le pensait, découvrant ainsi cinq nouveaux métaux alcalins : potassium, sodium, calcium, baryum, strontium. Berzélius poursuivit avec d'autres éléments : cérium, sélénium, thorium, lithium, vanadium.

Davy reçut pour ses résultats le prix de 3000 F de l'Institut, créé en 1801 par Bonaparte, récompense appréciable pour deux raisons : ce prix ne fut décerné qu'une seule fois et les relations politiques franco - anglaises étaient à cette époque particulièrement tendues. Il montrait que la science se devait d'être apolitique.



a Voltamètre

Mais Faraday, jeune assistant de Davy, portait ombrage au maître par ses réussites, lorsqu'il démarra sa carrière par des recherches chimiques. Il les délaissa quelques années pour découvrir l'induction, deuxième grande avancée de l'électromagnétisme, puis reprit la chimie en 1833.

Il appliqua son talent d'expérimentateur sur l'électrolyse, et en définit la terminologie toujours actuelle, *électrolyte, électrode, cathode, anode, ion, anion, cation,* termes dérivés du grec, *ion* signifiant voyageur.

L'appareil de base des expériences était le *voltamètre,* (a) une simple cuve contenant l'électrolyte à analyser. Deux électrodes, généralement en platine, émergeaient chacune dans un tube pour recueillir les gaz dégagés par l'électro-lyse de l'eau, une partie d'oxygène pour deux parties d'hydrogène.

Il déduisit expérimentalement les **lois de l'électrolyse** (b) :

1- L'action électrolytique d'un courant est la même dans toutes les parties d'un circuit.

2 - Le poids de matière décomposée est proportionnel à la quantité d'électricité qui la traverse.

3 - La quantité de gaz dégagé par minute est une mesure absolue de l'intensité du courant.

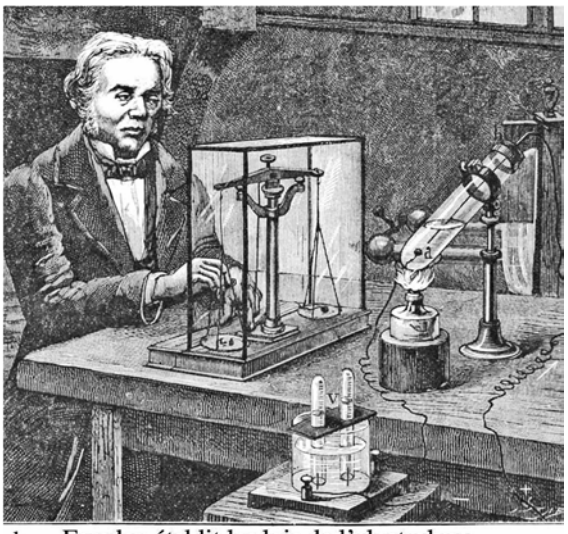
Ainsi, l'unité d'intensité serait celle qui libérerait 1 gr d'hydrogène par seconde.

4 - Lorsqu'un même courant agit sur plusieurs électrolytes, les poids des corps décomposés dans le même temps sont proportionnels à leurs équivalents chimiques.

Il faut par exemple une quantité de 96 490 coulombs pour dégager 1 gr d'hydrogène, ou le poids équivalent d'un autre corps.

La compréhension de l'électrolyse progressa dans les années 1880 par les recherches du Suédois Svante Arrhénius sur la conductibilité galvanique des électrolytes. Il définit la loi de variation de vitesse d'une réaction chimique en fonction de la température.

Mais ce n'est que lorsque Rutherford précisa la structure atomique de Bohr en 1911 que l'on comprit vraiment l'électrolyse.


b Faraday établit les lois de l'electrolyse

La galvanoplastie

Sous cette dénomination du XIX[e] (1), l'*électroplating* pour les Anglais, on range souvent différents procédés d'électrolyse dans lesquels se dépose sur une électrode un métal provenant soit de l'autre électrode, soit sous forme de sel dissous dans la solution aqueuse.

Il est probable que le procédé ait été appliqué dans l'Antiquité, au Moyen-Orient, sans nécessiter aucune connaissance de l'électricité (I-3, c.11).

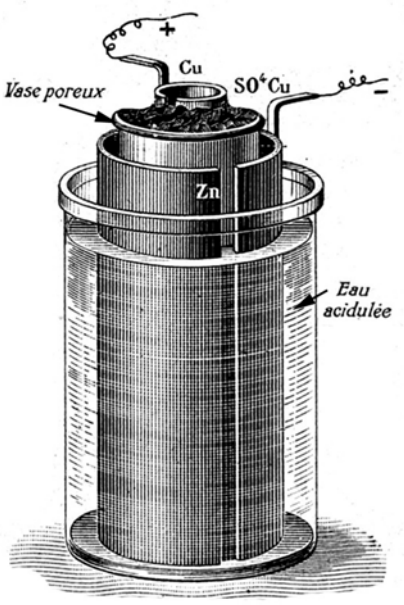
Les précurseurs

Luigi Brugnatelli, chimiste à Pavie, ami de Volta, étudia l'action du courant sur les dissolutions de sels et d'oxydes métalliques, dont le plus simple le sulfate de cuivre ; mais ces dépôts sur la cathode étaient pulvérulents ou lamelleux et peu adhérents.

Cependant, il décrit dans une lettre de 1802, adressée au *Journal de physique et chimie de Belgique*, un procédé pour obtenir un dépôt de différents métaux, platine, or, argent sur le fil conducteur à la cathode constituée d'un autre de ces métaux. Il utilisait leur ammoniure en traitant par l'ammoniaque l'azotate d'argent ou le chlorure d'or. « *J'ai doré d'une manière presque parfaite deux médailles d'argent, en les faisant communiquer, à l'aide d'un fil d'acier, avec le pôle négatif d'une pile de Vota, en les tenant dans l'ammoniure d'or nouvellement fait et bien saturé* ». Ces ammoniures étaient nécessairement dissous, or ils sont insolubles.

D'autres expérimentateurs ont repris ces essais, mais n'ont obtenu que des dorures imparfaites. En Suisse, de La Rive essaya avec du chlorure d'or sans succès.

L'invention



c Pile Daniell

Le problème fut repris, mais sous un autre angle, en 1837, par le Russe Moritz Hermann von Jacobi de Saint Petersbourg. Il était l'homme qui fit naviguer un canot électrique sur la Neva en 1838, avec le premier moteur électrique valable (IV-1). Pour son projet, il recherchait une batterie de piles aussi puissante que possible. Avant d'adopter des piles de Grove, il essaya d'améliorer la pile Daniell (c), première pile impolarisable. Elle est constituée d'une anode en cuivre cylindrique trempant dans le sulfate de cuivre contenu dans un vase en porcelaine poreuse. Celui-ci, ceint d'une cathode en zinc, est immergé dans de l'eau acidulée à l'acide sulfurique. L'hydrogène dégagé par la décomposition de l'eau traverse la paroi poreuse et réagit sur le sulfate de cuivre, en libérant du cuivre qui se dépose sur l'anode en cuivre.

Cet appareil avait une particularité que son inventeur Daniell avait dû remarquer, sans plus, et que de La Rive avait simplement noté en 1836 en essayant cette nouvelle pile : *la plaque de cuivre est recouverte d'une couche de cuivre à l'état métallique qui s'y est incessamment déposé par molécules, et telle est la perfection de la feuille de métal ainsi formée par dépôt du cuivre, elle offre une copie fidèle de chaque éraillure de la plaque sur laquelle elle s'est formée.*

Ce fait anodin frappa Jacobi. L'année suivante, il l'approfondit par des essais. Il arriva à obtenir une feuille de cuivre donnant en relief l'aspect exact d'une anode de cuivre gravée en creux au burin, sur laquelle elle s'était déposée et qui s'en détachait.

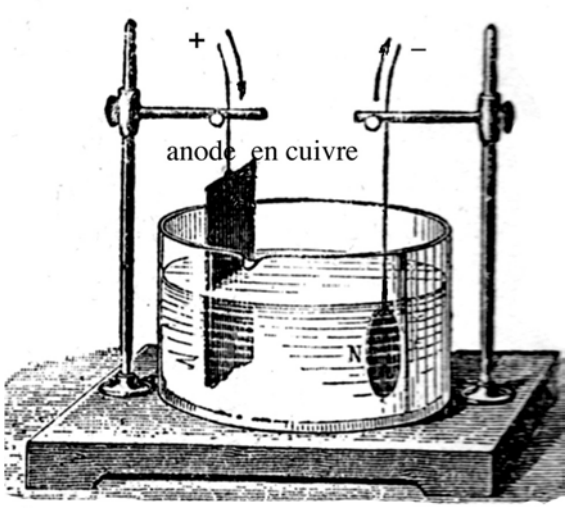
L'inconvénient des grains et lamelles de métal qui n'adhéraient pas sur la cathode dans les expériences de Brugnatelli et autres devenait un avantage pour ce nouveau système de reproduction du relief.

On retrouve là un processus de découverte assez particulier, où l'inventeur transforme un inconvénient, rédhibitoire pour une application, en un avantage pour une autre.

Analogie avec le judo où un partenaire cherche à retourner la force de son adversaire contre lui-même. C'est le même raisonnement qui avait conduit Planté à inventer l'accumulateur électro-chimique.

Jacobi présenta sa plaque de cuivre à l'académie des sciences de St Petersbourg le 5 oct. 1838. Son invention fit quelques bruits dans le petit monde scientifique anglais, à la tête de la nouvelle science électrique (2). L'empereur Nicolas lui alloua des fonds pour poursuivre ses recherches.

Plutôt que de faire le dépôt de cuivre sur la cathode d'une pile Daniell, il fit débiter ses deux fils dans un bain séparé de sulfate, l'objet à reproduire étant relié à la cathode et un charbon ou du platine relié à l'anode positive. Mais l'opération ralentissait avec l'appauvrissement en cuivre de la solution de sulfate, alors il suspendit dans la cuve un petit sac de toile contenant du sulfate en grains qui se dissolvait en conservant la saturation du soluté. Finalement il suffisait simplement de réaliser l'anode en cuivre ; elle s'oxydait en sulfate, maintenant ainsi constante la concentration de la solution.



d Galvanoplastie d'une médaille

Avec ce procédé d'*anode soluble*, tout se passait comme si le cuivre de l'anode se déposait sur la cathode (d). Cette petite invention fut exploitée par les électrochimistes dans d'autres processus.

Jusque-là, il était nécessaire que la cathode à reproduire soit conductrice pour recevoir en surface le dépôt de cuivre. Par hasard, Jacobi remarqua que des inscriptions qu'il avait écrites sur le vase en porcelaine d'une pile s'étaient revêtues ensuite de cuivre. Le crayon avait une mine en plombagine, nom du graphite à l'époque. D'où l'idée de recouvrir de plombagine des objets non-conducteurs, en plâtre ou en cire à cacheter et de les utiliser comme cathode.

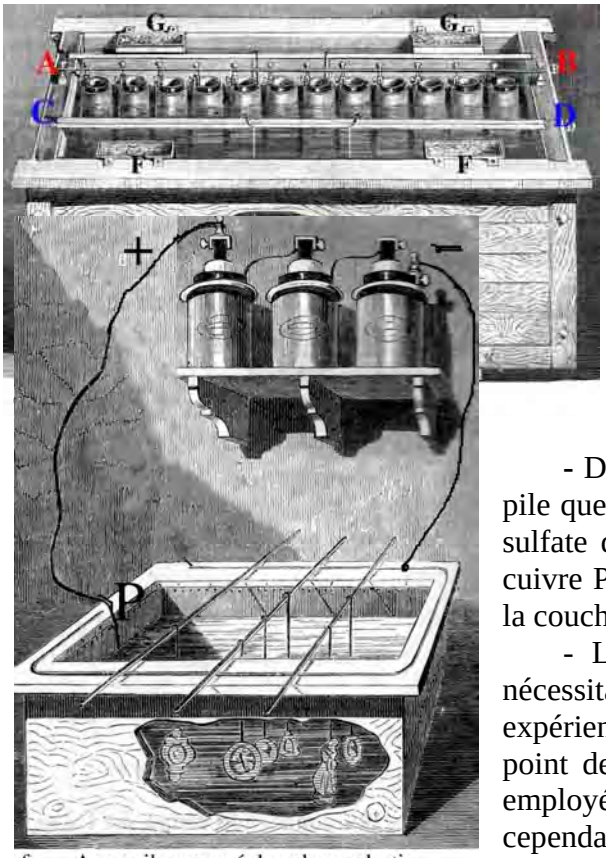
Il suffisait donc de réaliser de véritables moules d'un objet dans une matière assez plastique comme le plâtre ou la cire à cacheter. La mieux adaptée fut la gutta-percha, qui ramollie à la chaleur, s'appliquait sur l'objet dont elle reproduisait tous les détails avec une fidélité étonnante. Ensuite ce moule, revêtu de plombagine pouvait recevoir une couche de cuivre électrolytique, qui une fois retiré grâce à sa *plasticité* représentait exactement l'objet initial et donna à ce processus le nom de *galvanoplastie.*

Applications

Cette invention allait créer la première industrie issue de l'électricité. D'ailleurs, Nicolas, empereur avisé, pressentant ce développement industriel, racheta pour 25 000 roubles le brevet russe de Jacobi. Son gendre, petit-fils de l'impératrice Joséphine, duc de Leuchtenberg, construisit en Russie une importante usine de galvanoplastie qui occupa jusqu'à 2500 ouvriers. Elle réalisa en particulier 12 statues, hautes de 3 mètres pour l'église Saint Isaac de St Petersbourg.

Le matériel nécessaire, relativement simple, fut mis au point en quelques années, mais nécessitait un savoir-faire expérimental, acquis par seulement par quelques spécialistes. Suivant les expériences de Jacobi deux types de cuves d'électrolyse étaient utilisées en fonction des opérations envisagées :

L'appareil simple dans lequel la fonction de génération de courant par une pile type Daniell est placé dans la même cuve que la pièce à reproduire (e). Les cathodes en zinc sont suspendues par la tige AB dans une douzaine de vases poreux contenant l'acide sulfurique. Les moules E sur lesquels le



f Appareil composé de galvanoplastie

cuivre doit se déposer constituent l'anode positive, ils sont suspendus à la tige CD, elle-même reliée électriquement à AB.

Pour que la solution de sulfate reste toujours saturée, pendant que son cuivre se dépose pour former la reproduction sur E, elle se régénère par dissolution de cristaux de sulfate contenu dans les petits sacs F et G.

C'était l'appareil le plus utilisé pour des pièces planes de petites dimensions. Pour les pièces importantes ou les volumes en *ronde-bosse*, l'appareil composé est préférable.

- Dans **l'appareil composé, l**e générateur de courant, une pile quelconque, est séparé (f) ; il alimente une cuve pleine de sulfate de cuivre dans laquelle sont immergés une plaque de cuivre P reliée à l'anode, et les moules sur lesquels se dépose la couche de cuivre, reliés à la cathode.

- La confection du **moule** est une opération délicate, nécessitant l'optimisation de plusieurs paramètres par expérience, dont sa matière, plâtre, cire, stéarine, alliage à bas point de fusion. L'objet lui-même à reproduire pourrait être employé, mais on craint de le détériorer. Il ne donnerait cependant qu'un modèle inversé, avec lequel on pourrait mouler le moule final.

- La reproduction de gros objets, en particulier en **ronde-bosse**, comme des statues dans les trois dimensions posait un problème difficile, tant pour réaliser un moule ouvrant en demi coquilles, que pour répartir à l'intérieur uniformément le dépôt de cuivre. Ce fut Lenoir, connu comme l'inventeur du moteur à gaz, qui proposa de remplacer l'anode soluble par une sorte de grillage en fils de platine insolubles, mais à proximité d'un sachet de cristaux de sulfate (g). Ces fils formaient un maillage un plus petit que la forme de l'objet dans le moule sans le toucher. Le moule lui-même à l'intérieur duquel se dépose le cuivre est relié à la cathode.

g Galvanoplastie en ronde bosse

Cela marchait, mais le platine était cher. Restait à trouver autre chose, ce fut Planté, grand utilisateur de plomb pour ses accus, qui proposa des fils en plomb oxydés et même une coque de la forme du vase, plus petite, percé de trous. Sur la gravure g, le grillage de fils a été superposé uniquement pour illustration, sur le procédé de la coque de plomb trouée.

La galvanoplastie révolutionna trois domaines:

– La **fonderie d'art,** pour de petits objets, médailles, pièces d'orfèvrerie, jusqu'à des statues de grande dimension. Il y avait d'abord la reproduction décidée par Napoléon III, exécutée par Oudry, des 600 bas-reliefs de la colonne Trajane de Rome, pour être présentés au Louvre en 1864.

J2 Statue ND de la Garde

j Groupe de la façade de l'Opéra de Paris

Aux statues de St Petersbourg déjà citées, il faut ajouter les deux groupes, hauts de 5 m en haut de la façade de l'opéra à Paris Surtout la grande statue de 9 m de la Vierge au sommet de ND de la Garde à Marseille.

Ces grandes statues fabriquées par Christofle vers 1867 ont été « galvanoplastifiées » en cuivre de quelques mm d'épaisseur, en plusieurs morceaux ensuite soudés, dans une cuve profonde de 10 mètres. Pour la Vierge, il a fallu 2,5 mois pour déposer le cuivre épais de 4 à 5 mm. Pour pallier la rigidité trop faible, un alliage de laiton était fondu à l'intérieur sur une dizaine de cm. Le poids total n'était que de 3,5 t (j2).

Il est probable que des batteries de piles étant insuffisantes, le courant continu a été fourni avec une machine de l'Alliance, au fonctionnement incertain. Ce sont ces machines qu'a analysées Gramme, modeleur chez Christofle, pour concevoir sa dynamo, dont l'un des premiers exemplaires de 1873 était fabriqué pour Christofle. Les statues ont été ensuite dorées à la feuille. Le prix et le poids de ces pièces en bronze aurait été beaucoup plus élevés, le poids sans doute impossible pour la statue.

– **La gravure** sur cuivre était jusqu'à la fin du XIX^{e}, avant la photographie, le seul moyen de reproduction d'images pour l'imprimerie. Ce livre, riche en gravures anciennes, n'en est qu'une fausse réapparition, grâce à l'infographie.

D'abord pour obtenir des planches de cuivre d'une parfaite pureté, nécessaire pour la gravure fine. Surtout pour reproduire les planches sur bois, mais dont l'usure ne permettait pas de gros tirages. Le procédé permit des tirages parfaitement identiques des planches à billets de banque ou de timbres-poste.

– **La typographie** bénéficia aussi de la galvanoplastie pour diverses applications, dont la reproduction de matrices de caractères.

Galvanoplastie d'or et d'argent

Si le cuivre est le métal qui se prête le plus facilement à ce procédé c'est qu'il a un sulfate qui a permis à Daniell d'en faire un élément de sa pile. Ce n'est pas le cas de l'or, ni de l'argent. Ils ont bien un chlorure soluble, mais qui n'a rien donné de satisfaisant après essais. Il faut donc avoir recours à des sels doubles solubles de ces métaux, des cyanures d'or et d'argent dissous dans du cyanure de potassium.

En dehors d'une certaine complexité et la manipulation de cyanure de potassium toxique, la galvanoplastie des deux métaux précieux s'effectue dans des appareils composés semblables à ceux du cuivre, avec une pile indépendante.

Le procédé ne s'est pas développé pour l'or, métal facile à travailler pour les bijoux, un peu plus pour l'argent pour de belles pièces de service de table, mais concurrencées par des pièces identiques obtenues avec du cuivre et ensuite argentées par un simple dépôt superficiel, comme développé ci-après.

Aujourd'hui la galvanoplastie proprement dite est peu pratiquée ; par contre, les dépôts de métal en surface se sont très développés, au point qu'on les dénomme aussi par le même terme, créant une confusion.

Dépôts électrochimiques

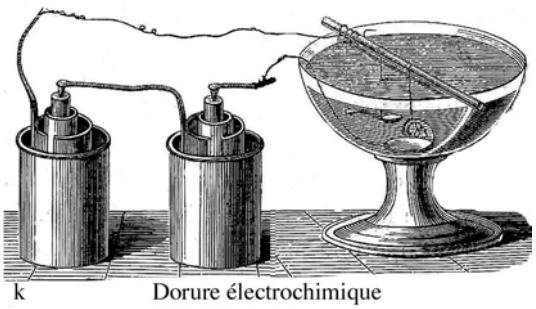
C'est le nom que l'on donnait, au début, à ce procédé d'un principe identique à celui de la galvanoplastie, mais au lieu de déposer sur un moule une couche de métal détachable, épaisse de quelques mm, pour en obtenir une reproduction exacte, on dépose sur un objet métallique une fine couche de métal adhérente pour l'embellir ou le protéger, cuivre, argent, or, nickel ou autre (3). La plus recherchée depuis l'Antiquité était la dorure par placage de feuilles très fines, obtenues par un long et délicat martelage de l'or très ductile entre des peaux comme le parchemin.

Depuis des siècles, un autre procédé de dorure au mercure s'était répandu. De l'or dissous dans le mercure formait un amalgame qui, après filtration à travers une peau fine, était appliqué au pinceau sur la pièce à dorer, généralement en cuivre ou bronze. Ensuite le mercure était évaporé par chauffage, puis la pièce polie au brunissoir.

Les vapeurs de mercure que respiraient les ouvriers étaient particulièrement dangereuses. La dorure de la coupole de l'église St Isaac à St Petersbourg en 1837 a intoxiqué 200 ouvriers, atteints de tremblements mercuriels.

Le problème était d'importance, il mobilisa nombre de chimistes depuis Brugnatelli et de La Rive, précurseurs déjà cités. Des Allemands s'aperçurent que le défaut d'adhérence de l'or sur le métal provenait de l'acidité de la liqueur de chlorure d'or attaquant le métal avant le dépôt d'or. Il fallait une liqueur alcaline.

Solution qu'adoptèrent les frères Henri et Richard **Elkington** de Birmingham. Ils découvrirent la dorure par simple immersion, sans pile, dans une solution alcaline de chlorure d'or, et prirent en 1836 le brevet de la *dorure au trempé.* Mais la pellicule d'or déposée sur le cuivre restait très mince. Après la découverte de la galvanoplastie en 1838 par Jacobi, ils reprirent leurs recherches en utilisant le courant d'une pile débitant dans un bain alcalin d'oxyde d'or dissous dans du prussiate de potasse.



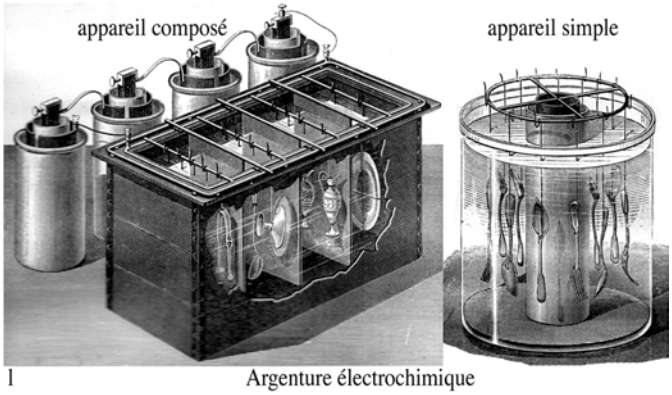
k Dorure électrochimique

Le 29 septembre 1840, Henri Elkington prenait le brevet de la dorure voltaïque et le même jour, Richard celui de l'argenture (k). De nouveaux inventeurs se révélèrent. L'un d'eux, le Français Henri de Ruolz, prenait un brevet pour la *dorure de l'argent par immersion* en décembre 1840.

Un peu plus tard en juin 1841, un autre : *dorure au moyen de cyanure d'or dissous dans le cyanure de potassium.* Il fit part à l'Académie de ses travaux, qui ne mentionna pas le nom d'Elkington dans son rapport, d'ou protestation de ce dernier. À ce moment, se décernait un prix Montoyon pour les perfectionnements apportés aux *arts insalubres.* Un prix de 3000 F fut accordé au genevois de la Rive, un autre de 6000 F à Elkington, le même à Ruolz.

L'industrialisation

Charles **Christofle**, l'un des premiers bijoutiers parisiens racheta le brevet de Ruolz et l'employa en tant que chimiste dans l'usine qu'il venait de créer rue de Bondy. Il fut contraint d'y associer aussi Elkington en 1842.



l Argenture électrochimique

Christofle transforma complètement les méthodes empiriques, basées sur le *tour de main* qui prévalait jusque-là avec l'emploi de matériels réduits (l), par une véritable industrialisation bien organisée (m).

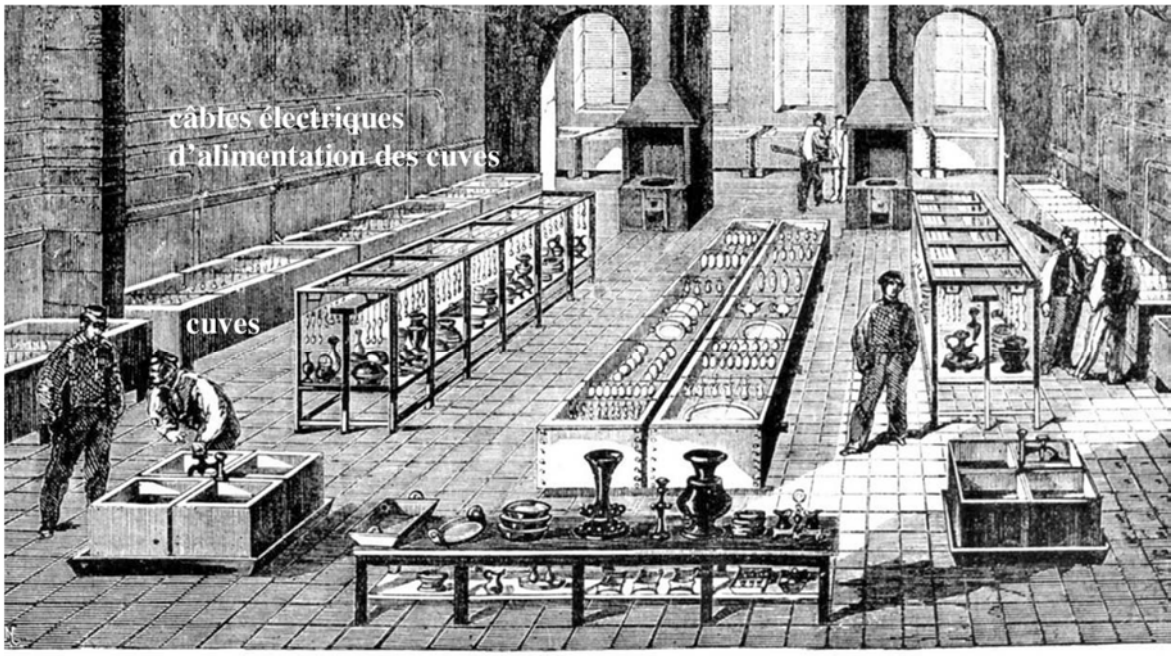
Ses ateliers étaient spécialisés dans l'ensemble des techniques, la galvanoplastie et sa fabrication délicate des moules, comme le dépôt d'or, d'argent et autres métaux, cuivre, nickel, zinc, étain qui nécessitait un décapage soigné avant dépôt et après, un long polissage au *gratteboessage* suivi du *brunissage.*

Au début, il eut rapidement nombre de procès en contrefaçon, mais il dominait le marché et s'imposa presque seul, lorsque le brevet Elkington tomba dans le domaine public.

Les couverts de table représentaient un créneau important qui dura jusqu'au XXe siècle. Auparavant, ils étaient en bois ou en étain car le cuivre s'oxydait, en argent massif chez les riches. L'argenture a permis à la bourgeoisie d'avoir du luxe pour un moindre prix.

Ruolz inventa aussi un alliage intermédiaire, le *tiers-argent* ou *ruolz,* 1/3 d'argent, 2/3 de cuivre et de nickel. La dorure de l'argent donnait un métal précieux apprécié, *le vermeil*.

L'aluminium n'apparut pour les couverts de table qu'après 1920 et l'inox dans les années 1960.



m Atelier des bains pour l'argenture électro-chimique dans l'usine de MM. Christofle, à Paris

Dans son histoire, *Les grandes usines* de 1866, Turgan donne une idée de l'importance de cette industrie : « *La maison Christofle a argenté 5 600 000 couverts, avec 33 700 kg d'argent valant 6 700 000 F… avec l'épaisseur adoptée pour les couverts, 5 grammes par décimètre carré, cela couvrirait une superficie de 112 000 mètres carrés.* »

L'*Usine électrométallurgique d'Auteuil,* fondée par Oudry (h), ne concurrençait pas Christofle dans l'orfèvrerie, étant spécialisée dans les grosses pièces, dont le cuivrage des candélabres parisiens en fonte sur lesquels les peintures de l'époque ne tenaient pas à la rouille.

h Atelier de cuivrage galvanoplastique de l'usine Oudry.

Électrozingage

Ces procédés de dépôts métalliques ont peu évolué sur le principe, sinon par leur mise en œuvre industrielle.

Le plus répandu aujourd'hui est l'électrozingage de l'acier, métal le plus répandu au monde, mais dont le talon d'Achille est la corrosion à l'air, l'oxydation, que le perfectionnement des peintures ne limite que temporairement. Repeindre la Tour Eiffel tous les 7 ans est fort coûteux.

L'électrozingage, par électrolyse du sulfate de zinc, s'est généralisé avec différentes méthodes, en particulier à partir de 1970 pour les autos. Leurs tôles, toujours plus minces, résistaient mal au-delà d'une décennie.

Traitement des minerais

Différents minerais chargés d'impuretés, cuivre, zinc, plomb sont traités par l'électrolyse dans un sel du même métal. Le métal pur se fixe à la cathode et les impuretés tombent au fond.

Autres applications de l'électrolyse

L'électrolyse est aussi utilisée dans le tannage des peaux. De même dans la rectification des alcools qui prennent parfois mauvais goût ou odeur par développement d'aldéhydes, alcools déshydrogénés auxquels l'électricité peut rendre leur hydrogène. Le vin pourrait peut-être s'améliorer avec ce procédé.

ÉLECTROCHIMIE avec de fortes puissances électriques

Après 1880, l'apparition des génératrices électriques puissantes, Gramme, Siemens et autres, d'abord pour l'éclairage, puis pour la force motrice, vont provoquer la naissance de nouvelles industries électrochimiques nécessitant de fortes puissances. Les centrales pour les fournir nécessitaient alors des puissances électriques unitaires bien supérieures à celles de l'éclairage au début de son développement.

Parfois, elles se contentaient de l'énergie des moteurs à vapeur approvisionnés en charbon, peu éloignés des mines. Mais l'énergie hydraulique des chutes d'eau de montagne ou des grands fleuves constituait un réservoir d'énergie moins cher. Le prix du kWh étant l'élément principal du prix de revient dans ces industries.

Dans les Alpes, l'hydraulique avait connu, grâce à la turbine, un début d'exploitation directe pour la papeterie à base de fibres de bois. L'entraînement de générateurs électriques par la turbine, l'hydroélectricité, prit ensuite une expansion rapide, dans la dernière décennie du XIX^{e} siècle. Ainsi 19 centrales de plus d'un MW, 70% du total, furent mises en service pour l'électrochimie et l'électrométallurgie.

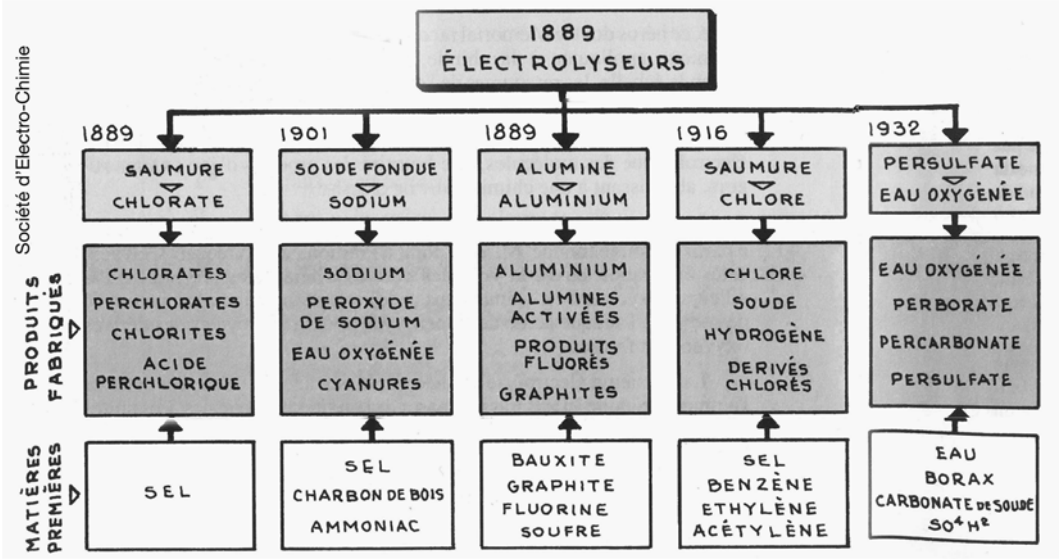
L'hydroélectricité des Alpes avait néanmoins un sérieux inconvénient, l'irrégularité saisonnière, une variation entre hiver et été de 30 à 50 %, avec des extrêmes de un à dix fois. La puissance des équipements hydroélectriques était alors déterminée pour la valeur atteinte pendant au moins huit mois.

En 1900, 25 à 30 % de l'électricité produite en France était consommée par l'électrochimie et l'électrométallurgie. L'hydraulique assurait alors la moitié de la production totale, le charbon l'autre moitié.

Les fortes puissances nécessaires à l'électrochimie étaient l'électrolyse ainsi que l'utilisation des très hautes températures du four à arc pour dissocier des corps composés en leurs éléments simples, ou l'inverse

Électrolyse

Elle nécessite obligatoirement du courant continu, difficile à générer à de très fortes intensités



Tous ces produits et sous-produits étaient élaborés en France par la plus importante société dans ce domaine, la *Société d'Électro-Chimie, SEC,* (1889 – 1965) (6), sauf l'aluminium dont la Cie Péchiney détenait presque le monopole.

Les 18 usines de la SEC fonctionnaient avec la matière première de base, l'énergie hydroélectrique, fournie par 27 centrales. La première de ces usines fut construite à Vallorbe.

Vallorbe

Sur ce site du Jura suisse, la SEC, juste créée en 1889, construisit sa première usine consacrée à la fabrication des chlorates, suivant le brevet d'Henry Gall, fondateur de la société. La chute de l'Orbe au Saut du Day (70 m) apportait 1600 ch aux 10 turbines Rieter, couplées aux dynamos Thury. La faible tension nécessaire de 150 V imposait des câbles de 1450 mm^2, longs de 300 m, distance entre la centrale et l'usine d'électrolyse plus haute (zu). Ce fut la centrale la plus puissante du monde pendant plusieurs années, et l'usine chimique un prototype pour cette nouvelle forme d'électrochimie. Les petites cuves de 3000 et 6000 A fonctionnaient en discontinu, remplies et vidangées toutes les semaines.

La production de chlorate de potassium atteignit 800t/an dès 1892 pour atteindre au mieux 3500 t/an, profitant des améliorations réalisées dans l'usine sœur établie à Prémont en 1895.

Usine de phosphate à Vallorbe - Suisse -1890

Electrolyse de l'aluminium

Ce métal, léger, d'un blanc brillant, presque inoxydable, bon conducteur de la chaleur et de l'électricité était l'un des nombreux corps simples identifié par les chimistes depuis les années 1810. En 1825, Wöhler de Göttingen parvint à en fabriquer une petite quantité. Difficile à obtenir, il suscita la curiosité en Angleterre, France, Allemagne et Amérique.

L'aluminium doit être extrait à partir de son oxyde, l'alumine Al_2O_3. Celle-ci est présente à 8% dans l'écorce terrestre sous forme de différents minerais, le principal étant la bauxite, ou bien le corindon.

n Pièce d'orfévrerie en aluminium- Christofle -1862

Un lingot d'un kilo figurait à l'exposition de Paris en 1855 où il étonna la foule, dont Napoléon III, très intéressé par les sciences. Il avait été produit par Henri Sainte-Claire Deville, en modifiant le procédé de Wöhler, à partir du chlorure d'aluminium et de sodium, associé avec de la cryolithe, fluorure d'aluminium et de sodium. Très cher, 300 F le kg, c'était un métal précieux pour l'orfèvre Christofle, qui en fabriqua entre autres une pièce de table, encore exposée au Musée de Compiègne (n).

Sa petite usine de Nanterre en produisit 500 kg à 200 F le kg dans l'année 1859. Des accords sont alors passés avec H.Merle, directeur d'une société chimique, la Compagnie d'Alais et Camargue, établie à Salindres.

Elle restera jusqu'en 1889, la seule société au monde produisant industriellement de l'aluminium par un procédé chimique, à un prix oscillant autour de 80 F le kg, pour une quantité annuelle de 1000 à 2000 kg. Sa direction fut assurée après 1877 par Alfred Rangod, dit Péchiney, nom qui marquera le début d'une grande histoire industrielle en France.

Il peut paraître surprenant avec notre vision contemporaine, que cette production marginale d'un aluminium très onéreux n'ait pas suscité d'autres progrès pendant 25 ans. Cela peut se comprendre en réalisant la cascade de progrès et nouveautés que la révolution industrielle ne cessait d'engendrer depuis le chemin de fer en 1840.

Le monde scientifique et technique ne s'intéressait qu'à ce qui paraissait le plus facile à développer. Un nouveau métal comme l'aluminium n'était qu'une simple curiosité.

Divers procédés

Néanmoins, dans les années 1880 à 1890, une dizaine de chercheurs à se sont activé, dans plusieurs pays, pour trouver un procédé plus viable de production d'aluminium, ou mieux de bronze d'aluminium. Beaucoup doutaient de l'intérêt de l'aluminium, hors l'orfèvrerie ou des applications très spéciales. Plus intéressant apparaissait le bronze d'aluminium, du cuivre allié à l'étain plus d'autres métaux dont l'aluminium, pour renforcer ses caractéristiques mécaniques.

Les procédés expérimentés étaient **chimiques, électrothermiques**, ou **électrolytiques.**

Ils utilisaient les mêmes corps, en quantité et de façon différentes : l'alumine, le charbon de cornue ou graphite, les chlorures ou fluorures d'aluminium et sodium. S'y ajoutait l'élément clef des systèmes électrolytiques et électrothermiques, un nombre très élevé de kWh d'énergie électrique. La construction et les éléments du creuset ou four, différents dans chaque procédé, évoluaient en permanence d'une façon empirique.

Les réactions chimiques complexes qui se produisaient à haute température entre ces divers composés furent longues à comprendre exactement, au-delà du principe : la *réduction* de l'oxyde d'aluminium, consistant à en extraire l'oxygène, qui associé au carbone du graphite s'évacuait sous forme de gaz carbonique.

Procédés chimiques

Après celui de Salindres, ceux initiés par Castner, industrialisés à Oldburry, près de Birmingham produisaient soit du sodium à 2 F le kg, soit du chlorure double d'aluminium et de sodium. Ces deux produits, mélangés à de la cryolite, utilisé comme fondant, étaient ensuite chauffés dans un four réverbère classique à 1000° C. L'aluminium obtenu en petite quantité était d'un prix élevé. L'usine fonctionna jusqu'en 1891. Cinq autres procédés moins avancés sont aussi cités (4).

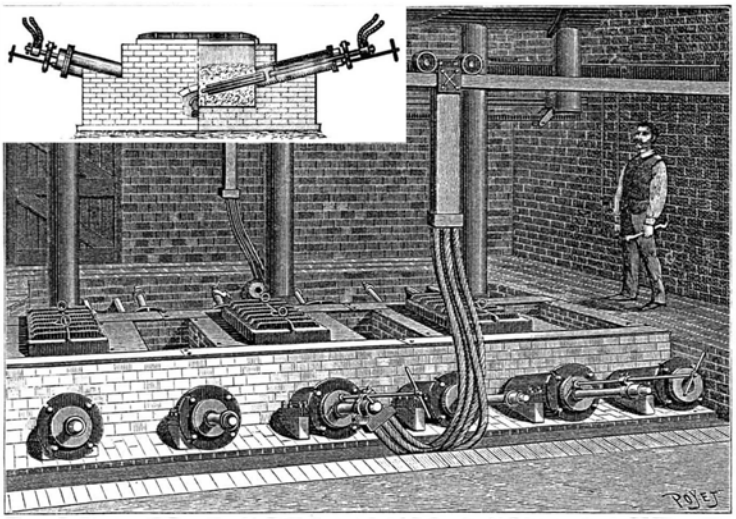
Procédé électrothermique Cowles

Plusieurs chercheurs ont travaillé sur cette voie. Le plus avancé a été le procédé des frères Alfred et Eugène Cowles, métallurgistes américains.

S'inspirant du four de Siemens, ils s'étaient lancés dans la fabrication d'alliages au four électrique, principalement le bronze d'aluminium, et le ferro-aluminium. Ils installèrent en 1885 une usine alimentée par l'énergie hydraulique d'une première dérivation du Niagara, puis l'*Electric Smelting and Aluminium Company* s'installa à Lockport, près de New York.

En 1887, une filiale, *Cowles Syndicate Company* fut créée en Angleterre à Milton. L'usine comprenait deux salles de six fours alimentés avec 5000 A par deux barres horizontales en hauteur, reliées à la génératrice (o)

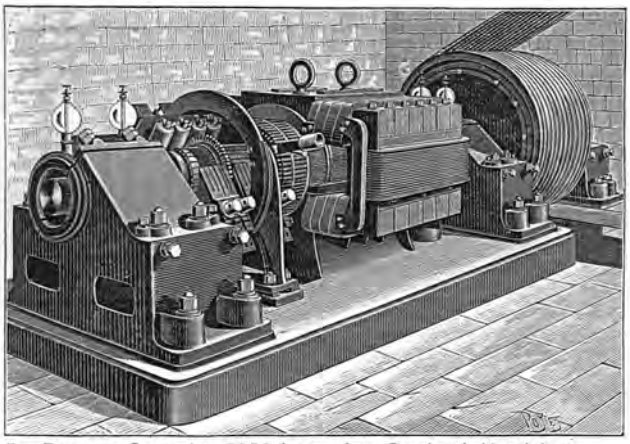
Un seul four fonctionnait à la fois. Les deux électrodes en charbon étaient connectées par des câbles souples, au contact vissé sur les barres conductrices. Le four était chargé avec 70 kg de minerai de cuivre, 40 kg de corindon et un peu de charbon en granulés. L'opération durait une heure et, après refroidissement, on retirait les scories et le lingot solidifié au fond, du bronze à 15 % d'aluminium.



o Batterie de 6 fours de Cowles pour le bronze d'aluminium - 1888

Pour obtenir de l'aluminium pur, la charge se faisait avec seulement du corindon et du charbon, mais le lingot d'aluminium obtenu contenait trop de poussières de charbon. Cowles étudia un four permettant au métal de s'écouler à la partie inférieure.

La dynamo (p), construite par Crompton, la plus puissante de l'époque, avait nécessité une conception nouvelle pour produire 5000 A en courant continu sous la faible tension de 60 volts. On remarque son très volumineux collecteur et la poulie d'entraînement de 1,25 m de diamètre avec 14 gorges pour câbles.



p Dynamo Crompton 5000 A pour four Cowles à Aluminium

Un fort coupe-circuit constitué de 12 lames de plomb était intercalé dans le circuit pour le rompre si l'intensité dépassait 8000 A, sans détonation, ni projection, compte tenu de la faible tension. Le procédé fut abandonné vers 1892, lorsque l'aluminium fut obtenu plus économiquement par électrolyse.

Procédés électrolytiques

Sainte-Claire Deville avait montré en 1859 que l'électrolyse du chlorure double d'aluminium et de sodium pouvait produire de l'aluminium, mais avec des piles, c'était vite limité. Deux autres précurseurs sont aussi cités, Rathenau et Kleiner en Allemagne, Lontin en France.

Ce dernier trouva la clef au problème de base. L'oxyde d'aluminium, l'alumine, ne fond qu'à 2000° C, mais en se dissolvant dans le fluorure double d'aluminium et de sodium, la cryolithe, la température de liquéfaction tombe vers 950°C. La solution peut alors être électrolysé, donnant de l'aluminium métal et de l'oxygène absorbé par combustion avec le carbone de l'anode.

En Angleterre, plusieurs chercheurs ont construit des systèmes variés sans arriver à des résultats probants. Simultanément trois inventeurs se sont engagés dans cette voie vers 1885 : en France Adolphe Minet et Paul Héroult, en Amérique Charles Martin Hall.

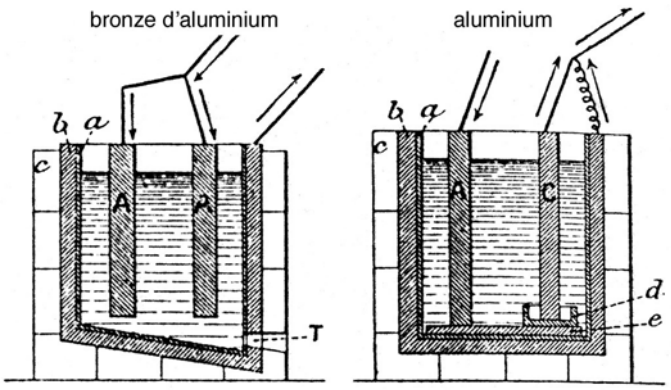
Leurs parcours parallèles se sont rencontrés non sans heurts, car les simples différences entre leurs travaux portaient sur la composition du bain d'électrolyse, des réactions chimiques complexes, difficiles à contrôler à haute température, et de la conception des creusets d'électrolyse : formes, électrodes, chargement et récolte du métal (4).

L'invention de la fabrication d'aluminium par électrolyse ressemblait en effet un peu à une cuisine chimique, mais régulée par l'électron, acteur inconnu jusqu'en 1911.

Alors chacun partait des mêmes ingrédients, oxyde d'aluminium, chlorures ou différents fluorures, soit double d'aluminium et de sodium, soit simple d'aluminium, de sodium ou de calcium et du carbone. On les assaisonnait en proportions variables avec une sauce commune de kWh pour la magie de l'électrolyse, et en plus pour chauffer le bain. S'y ajoutait surtout un essentiel et subtil *coup de main* ou *savoir-faire* pour la conception d'une casserole efficace, très particulière, le creuset à 1000° C, ainsi que les impondérables compagnons du chercheur, l'esprit pratique, l'imagination et le hasard.

Adolphe Minet

Il travaille en expérimentateur consciencieux, explore différentes compositions de bains et obtient l'appui de banquiers, les frères Bernard, pour créer un atelier à Creil en 1888 avec une machine de 800 A. Il obtient des résultats assez encourageants avec un bain de fluorure double d'aluminium et de sodium additionné de chlorure de sodium (q), pour lequel il prend un brevet en 1887.



q Creusets de Minet à Calypso en 1891

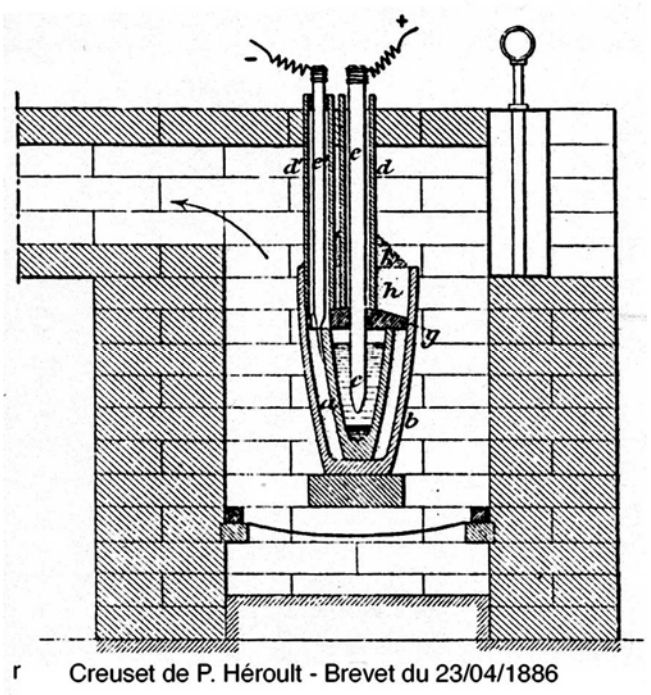
Les Bernard décident alors en 1890 la construction à St Martin la Porte de la première usine de Maurienne, la future vallée de l'aluminium, au lieu dit *île de Calypso* (5). La chute de la Valloirette, achetée au *pisteur* Chevrant, est équipée en 1891 sur 135 m de haut fournissant une puissance de 3,4 MW en hautes eaux. De mauvais choix pour les creusets et le bain apportent des déboires avec la malchance, et en 1894, les frères Bernard rendent à Minet leur droits sur ses brevets et mettent en vente Calypso.

Minet abandonne définitivement devant le succès de son nouveau voisin, Héroult à La Praz, dont les options s'avéraient meilleures.

C'est la Société Industrielle de l'aluminium, filiale de la Pittsburgh Company américaine, exploitant le brevet Hall qui rachète Calypso et la confie à Secrétan pour gérer la nouvelle installation de cuves semblables à celle de Niagara Falls. Les résultats n'atteignent pas les objectifs espérés et Calypso est à nouveau revendue en 1898. L'acheteur n'est pas le voisin, la SFEM implantée à La Praz, mais un nouveau venu dans l'électrolyse à haute température, la PCAC, Produits chimiques Alais et Camargue, dirigée par Péchiney. Elle adoptera finalement le procédé Héroult.

Paul Héroult

Imprégné dans sa jeunesse par la lecture du livre de Sainte-Claire Deville, *De l'aluminium* (1859), il installe en 1884 une dynamo de 400 A sous 30 V, attelée sur le moteur à vapeur de la tannerie paternelle. Il travaille avec deux amis et explore différentes solutions dont celle proposée par Lontin, la dissolution de l'alumine dans la cryolithe à 950° C. Après deux ans de recherches avec les ingrédients classiques d'une invention : expériences, observation, raisonnement, décision, il parvient en 1886 à obtenir de l'aluminium et prend un brevet avec la description claire et précise du procédé (r).



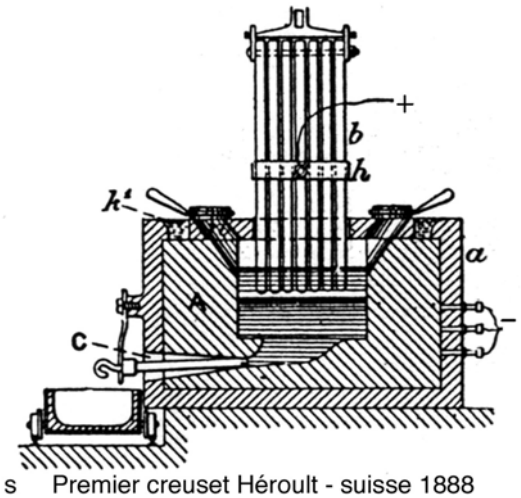
r Creuset de P. Héroult - Brevet du 23/04/1886

Procédé électrolytique pour la préparation de l'aluminium - brevet du 23/4/1886

En principe, le procédé que je désire breveter, pour la préparation de l'aluminium, consiste à décomposer de l'alumine en dissolution dans un bain de cryolithe en fusion, par un courant électrique aboutissant au bain, d'une part, au moyen d'une électrode en contact avec le creuset en charbon aggloméré qui contient la cryolithe et, d'autre part, au moyen d'une autre électrode, en charbon aggloméré comme la première, plongeant dans le bain. Cette combinaison produit la décomposition de l'alumine en employant un courant à faible tension :

l'oxygène se rend à l'anode et la brûle. L'aluminium se dépose sur les parois du creuset qui constitue la cathode et précipite dans le fond de ce creuset. Le bain reste constant et sert indéfiniment s'il est alimenté en alumine. L'électrode positive, c'est-à-dire l'anode en graphite, est à remplacer après combustion, mais cette combustion empêche la polarisation et assure, par cela même, la constance dans l'énergie et dans l'action du courant électrique.

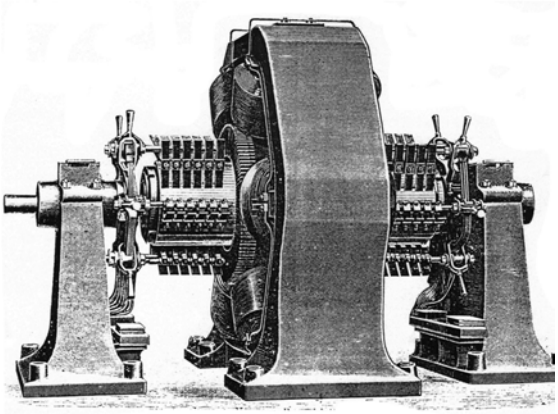
Héroult cherche alors des entreprises et financiers pour développer son procédé. Un ami l'introduit auprès du directeur de la PCAC de Salindres, qui devait être logiquement intéressé. Celui-ci, Péchiney, lui déclare au contraire que l'aluminium pur n'a guère de débouchés, même à prix plus faible. Par contre, il y en a certainement pour le bronze d'aluminium. Il s'adresse alors à la banque Rothschild qui confie l'examen du procédé à un rare expert, Minet, avec lequel Héroult était déjà en désaccord technique. Minet estimait que l'aluminium naissait par décomposition du fluorure d'aluminium, Héroult, par celle de l'alumine. Le rapport de Minet fut donc défavorable pour une raison technique, non pas concurrentielle comme on pourrait le penser. L'avenir prouva que le bain d'électrolyse de Minet n'était pas le meilleur.



s Premier creuset Héroult - suisse 1888

Un autre intermédiaire, Dreyfus, le met en contact avec la Société Métallurgique Suisse, SMS, établie à Lauffen qui prend ses brevets hors de France, Angleterre et Etats-Unis. La fabrication démarre en 1888 avec un premier type de creuset (s), une caisse en fer contenant des plaques de charbon A formant cathode. L'anode est un assemblage b de plaques de charbon suspendu, car Héroult avait compris l'un des problèmes, la densité de courant à la surface de l'anode devait être faible, quelques ampères par cm^2, imposant une grande surface anodique.

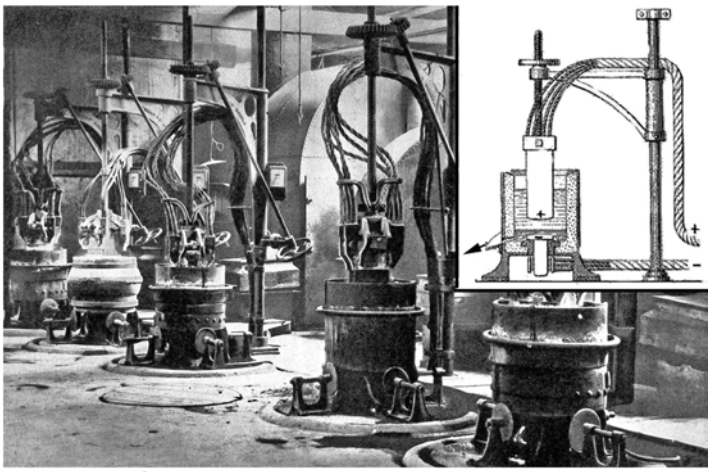
Le courant est fourni par deux dynamos Brown d'Oerlikon de 6000 A sous 20 volts chacune, nécessitant deux collecteurs avec 72 balais (t). Elles sont entraînées par une turbine Jonval de 300 ch. *Chacune de ces machines colossales pèse 10t et fournissent le courant aux creusets par des câbles de cuivre de la grosseur du bras* (7 cm). *La production journalière est de 300 kg d'aluminium ou 3000 kg de bronze d'alumi-nium à 10 %.*


t Dynamo Oerlikon 6000 A pour creuset d'aluminium

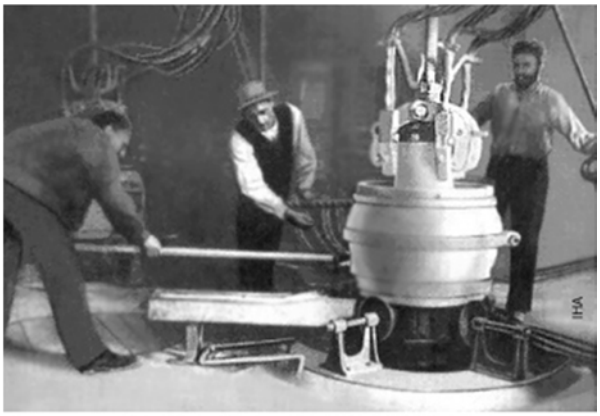
Simultanément la SMS se joint à l'AEG de Berlin pour créer à Neuhausen l'AIAG, *Aluminium Industrie Aktien Gesellschaft*, exploitant une chute du Rhin de 2000 ch. Héroult en est le directeur technique mais sous la direction de l'allemand Kiliani. Celui-ci apporte au creuset précédent des modifications que l'on retrouvera dans l'étape suivante à Froges.

En effet, Héroult n'avait pas le tempérament pour rester longtemps dans ce cadre suisse-allemand un peu rigide. Dreyfus, en homme d'affaires associé à la banque Goldschmidt, trouve deux entrepreneurs lorrains, Munerel et Viard, qui rachètent les brevets français et la compétence d'Héroult pour 25 000 F et constituent fin 1888 la SEMF, *Société Électrométallurgique Française*. Elle achète à Chevrant, papetier à Domène en Grésivaudan, une petite chute d'eau à équiper sur le Ruisseau des Adrets, pour installer une usine à Froges, village non loin de Grenoble. La puissance disponible était très fluctuante, au mieux 400 ch l'été en hautes eaux.

Cette première usine d'électrochimie de France démarre en avril 1889 avec 4 creusets carrés, type (s), de 4000 A, avec une grosse anode carrée, fabriqué dans une usine voisine, à Champ, construite par Hulin. Elle produira au début du bronze d'aluminium, plus facile à obtenir ; ensuite, fin 1889, de l'aluminium avec des creusets à anodes tournantes du type Kiliani.

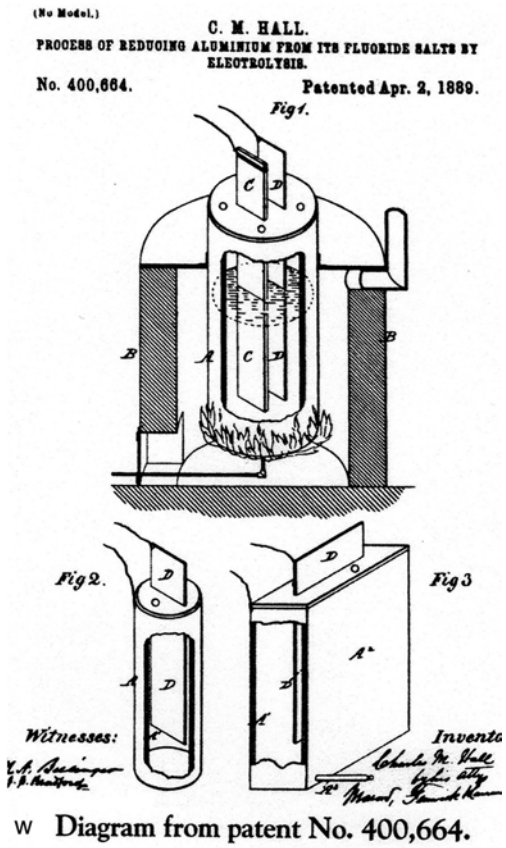


u Cuves d'aluminium de Froges - 1889



v Coulée d'un marmite de Froges -1890

Héroult les perfectionne en réalisant 6 creusets ronds qui peuvent tourner, l'anode restant fixe, ce seront les « *marmites* » (u). La production est de 1100 kg la première année, la suivante en 1890, de 31 000 kg, mais c'est trop, il y a mévente dans un marché à créer. La situation se redresse en baissant le prix de 50 F/ kg à 6 F/kg. La puissance disponible à Froges étant trop limitée, la SFEM décide d'acquérir une chute plus puissante de 2,2 MW à La Praz, la seconde en Maurienne. Elle démarre en 1893 avec de nouvelles cuves donnant un meilleur rendement.



w Diagram from patent No. 400,664.

Charles Martin Hall

Il est arrive parfois que la même invention soit faite simultanément par deux chercheurs éloignés géographiquement. Plus rarement, cas de l'électrolyse de l'aluminium, on remarque nombre de similitudes entre les deux inventeurs Héroult et Hall. Aussi bien d'âge, de formation, de parcours inventif, de comportement face aux difficultés, comme de réussite, jusqu'à la date de prise de leur brevet, et même jusqu'à leurs années de naissance et de décès. Leur environnement respectif, les Etats-Unis et la France, traversaient tous deux une période de fort développement industriel, dont l'électricité était l'un des principaux moteurs.

Le déclencheur initial pour Héroult avait été la lecture de Sainte-Claire Deville. Pour Hall, étudiant à Oberlin Collège dans l'Ohio, ce fut son professeur de chimie, Frank Jewett. Celui--ci, au cours d'un séjour à l'université de Göttingen, avait rencontré Friedrich Wöhler, le découvreur de l'aluminium.

Après l'obtention de son diplôme de chimie en 1885, Hall fait ses premiers essais d'électrolyse avec des piles Bunsen dans un petit four chauffé au charbon permettant d'atteindre une température élevée.

Sa sœur Julia, chimiste, participe à ses travaux. Il apprend dans le *Scientific American* que Grätzel a obtenu du magnésium en électrolysant le fluorure de magnésium, et explore alors comme fondant de l'alumine les fluorures de calcium, magnésium, aluminium, potassium et sodium. Avec un four chauffé à la gazoline, il arrive enfin, en février 1886, à dissoudre l'alumine dans la cryolithe additionnée de fluorure d'aluminium. Hall dépose ses premiers brevets le 9 juillet 1886 (w). Mais il apprend qu'un Français, Héroult, avait déposé une demande de brevet US en mai pour un procédé presque identique, lequel était l'extension de son brevet français déposé le 23 avril.

L'américain Cowles fit aussi opposition, ayant breveté un procédé proche.

Après des mois, la procédure américaine accorda le brevet US à Hall (6). Ensuite un agrément intervint entre les deux co-inventeurs : chacun d'eux avait l'exclusivité dans une partie du monde, l'un en Amérique, l'autre en Europe. Ceci jusqu'à la fin des 15 années, soit 1907 ; après quoi on ne parla plus que du brevet Hall-Héroult. Il faudra d'ailleurs attendre les années 1970 pour que des tentatives de nouveaux procédés apparaissent en France, mais sans suite.

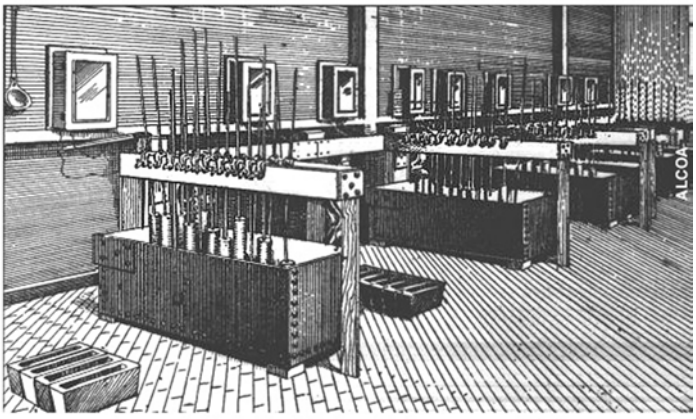
Il y avait cependant quelques différences entre les deux procédés :

– Au début, Hall portait le creuset à haute température par un chauffage extérieur à la gazoline, alors qu'Héroult s'en est rapidement affranchi en utilisant la chaleur dégagée dans le bain traversé par le courant d'électrolyse. C'était possible à condition de disposer d'un générateur électrique assez puissant.

– Hall rajoutait 25% de fluorure d'aluminium à la cryolithe.

– L'anode d'Héroult était en charbon massif, alors que Hall utilisait un grand nombre d'anodes de petite section, faciles à trouver chez les fabricants de charbons pour lampes à arc.

Ces petites différences disparurent progressivement du procédé Hall qui devint identique à celui d'Héroult. L'année 1887 fut consacré par Hall à la difficile recherche d'hommes d'affaires ou industriels pour exploiter son procédé. Finalement, au cours de l'été 1888, Alfred Hunt, industriel métallurgiste de Pittsburgh, convaincu de son intérêt, constitua la *Pittsburgh Reduction Company*.

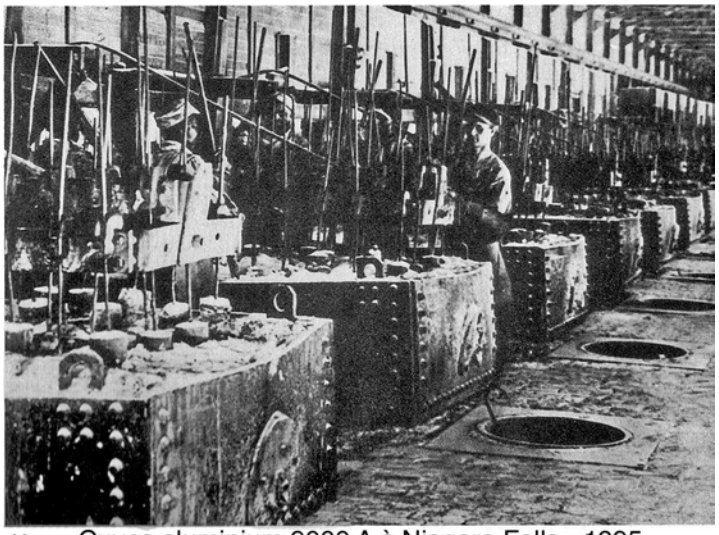


x Creusets Hall à la Pittsburgh Company - 1888

Au *Thanksgiving day*, l'usine pilote de New Kensington coulait ses premiers lingots d'aluminium, avec l'énergie d'une dynamo Westinghouse, entraînée par un moteur à vapeur. Hall et son nouvel associé Davis avaient conçu des creusets dans lesquels le bain était chauffé à 950° C par une résistance électrique, plus pratique que la gazoline (x).

Lorsque démarra la centrale du Niagara en 1895, la P.R.Co fut la première à bénéficier de cette énergie hydroélectrique en abon-dance et bon marché (y).

Lorsqu'en 1907 le brevet tomba dans le domaine public, elle devint l'ALCOA - *Aluminium Company of America* dirigée par Arthur V. Davis.


y Cuves aluminium 9000 A à Niagara Falls - 1895

Développements de l'électrolyse pour l'aluminium

Dès la fin du XIXe, la production d'aluminium par électrolyse s'amplifia dans tous les pays, avec prise de licence du brevet Hall en Amérique, du brevet Héroult en Europe, lui-même partagé avec l'AIAG germano-suisse. La British Aluminium Co, BACO, prit en 1894 une licence à l'AIAG.

Après WW2, les progrès techniques des cuves ne cessèrent de s'améliorer et les puissances de croître, cependant les implantations d'usines restent toujours conditionnées par la disponibilité proche d'une énergie électrique à bas prix, normalement l'hydraulique.

Électrolyse de l'aluminium en chiffres, aujourd'hui

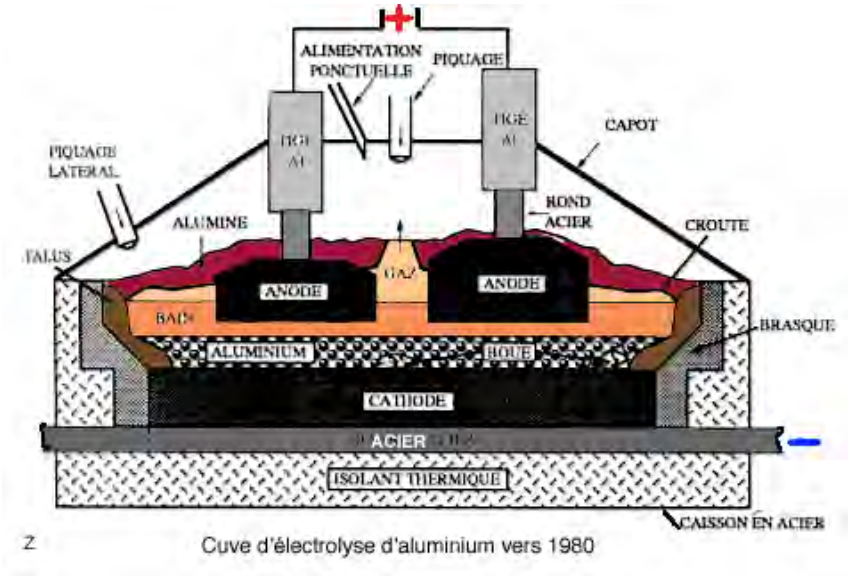
L'oxyde d'aluminium, alumine, est dissoute dans un bain fondant à 950° C, principalement composé de cryolyte. L'électrolyse *réduit* l'alumine : l'oxygène se dépose sur l'anode en carbone qui brûle en produisant du dioxyde de carbone, l'aluminium se dépose sur la cathode en carbone :

$$Al_2O_3 > 2\ Al + 3\ O^{2\cdot}$$

Cette réaction théorique est compliquée par des réactions secondaires complexes qu'on ne pouvait pas comprendre avant 1913, la constitution de l'atome de Bohr. Le bain ayant une densité d'environ 2, l'aluminium de 2,3 tombe au fond sur la cathode d'où il est périodiquement aspiré. Le CO^2 est évacué, mélangé avec des vapeurs de fluorures qui sont récupérées à 90%, polluantes et recyclables.

La production est de 7,5 kg d'aluminium par cuve, par jour et par millier d'ampères. La production de CO^2 à l'anode est de 1,5 t.

Pour obtenir une tonne de métal, il faut 1,9 t d'alumine, 0,4 t de carbone et 5,6 MWh pour l'électrolyse, porté au total à 13,5 MWh pour la chaleur du bain. Cette énergie n'est plus que la moitié de celle consommée en 1900. (z)



Cuve d'électrolyse d'aluminium vers 1980

L'électricité pour l'aluminium

Près du tiers du prix d'un lingot d'aluminium représente les kWh électriques nécessaires à son élaboration. Mais de plus c'est une électricité sous une forme très particulière, caractérisée par :

– sa nature, du courant continu, dont on a découvert après 1880 qu'il était impossible à transporter en basse tension à 1km.

– sa tension par cuve, de l'ordre de 30 à 50 V au début, est rapidement tombée en dessous de 10 V, **actuellement à 4 V**. L'électrolyse chimique proprement dite ne nécessitant que 1,65 V. Inconvénient qui s'est trouvé compensé par une mise en série des cuves par centaines.

– son intensité était au début de 4 à 8000 A – 30 000 A en 1938 – 100 000 A en 1950 – 300 000 A en 1991 – **350 000 A en 2000**, de loin le seul récepteur électrique à ce niveau, mais atténuant son handicap par la mise en série.

– sa puissance très élevée, imposant la proximité immédiate d'une source d'énergie très puissante et de faible coût.

– son fonctionnement permanent 24h/24. C'est un avantage pour l'amortissement du système de génération d'électricité et un inconvénient, car la défaillance d'alimentation électrique pendant quelques heures entraînerait des dégâts considérables aux cuves.

Une énergie électrique aussi particulière s'est adaptée à la montée en puissance de la production d'aluminium, en fonction de ses propres possibilités de développement. Dès le début, la source d'énergie presque idéale a été l'hydraulique, convertie en énergie mécanique par les turbines, dont l'évolution est connue. Les turbines type Girard à injection centrifuge, d'un assez faible rendement de l'ordre de 65%. Puis c'est l'apparition vers 1895 de la Pelton, venant d'Amérique, avec un rendement de 80 %, bien mieux adaptée aux chutes de plus de 200 m que la précédent. Au début, la régulation était manuelle, par des volants pour manœuvrer les vannes. S'il y avait coupure intempestive de la série de cuves, c'était l'emballement en survitesse et l'éclatement.

Les dynamos à très forte intensité se sont perfectionnées, avec des pôles de commutation, pour compenser le déplacement de la ligne neutre avec la charge. Les ensembles turbine-dynamo étaient regroupés dans une *salle des machines,* contiguë avec celle des cuves, pour réduire la longueur des connexions à très forte intensité. À partir des années 1930, pour augmenter la puissance, on commençait à faire appel à l'énergie de centrales satellites peu éloignées, produisant de l'alternatif transporté à 6 ou 10 kV. Leur électricité était abaissée en tension pour alimenter des groupes mixtes ou moteurs AC/dynamos CC, solution onéreuse.

Redresseurs

Assez rapidement, avec les puissances en augmentation continue, la production de courant continu en direct n'était plus possible. Il fallait l'obtenir à partir de courant alternatif, ce qui nécessitait un groupe de deux machines tournantes, le moteur en alternatif entrainant une dynamo en continu. Les recherches au début du siècle s'orientaient vers des redresseurs de courant statiques.

– À vapeur de mercure

Les premiers redresseurs à vapeur de mercure apparurent au début du siècle (IV-3). Leurs caractéristiques s'amélioraient chez les constructeurs, GECo, Westinghouse et BBC, mais leur chute de tension interne de 30 V était un inconvénient pour cette application.

Après WW2, différents modèles furent installés en 1948 par Péchiney à St Jean de Maurienne. Peu après apparaissaient les premiers redresseurs au germanium.

– **Redresseur mécanique.**

Bien que ce fut un système original dont le développement fut arrêté dès l'apparition du germanium, il fut envisagé pour l'électrolyse. Développé par Siemens pendant la guerre, il était constitué par plusieurs jeux de contacts dont l'ouverture et la fermeture étaient manœuvrées par un arbre à cames, tournant au synchronisme. Cela demandait une très grande précision du millième de seconde pour fonctionner exactement au passage à zéro du courant. Le rendement était très bon, 97% pour un fonctionnement à 250 V. BBC proposa un modèle triphasé 10 000 A à 400 V, mais après deux ans de mises au point ce fut l'abandon par Péchiney par crainte de sa difficile fiabilité mécanique et des possibles variations de fréquence. Deux redresseurs ont été installés dans les usines de la Société d'Electrochimie, de même un appareil à Solvay.

– **Vers le semi-conducteur**

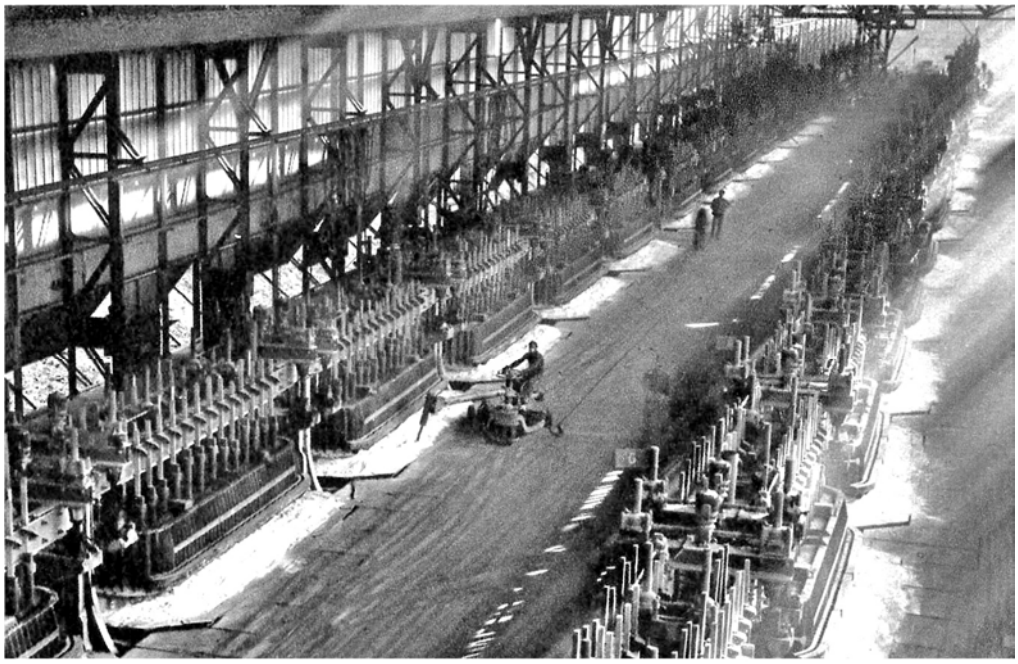
La British Thomson Houston BTH, proposait les premiers redresseurs au germanium en 1954. Alsthom en construisit sous licence, une première commande d'un groupe 20 000 A sous 300 V pour Péchiney. Après quelques mois, les 3/4 avaient claqué. On sait leur faiblesse de tenue aux surtensions dépassant 800 V, comme aux surintensités. Pour les protéger contre les fortes surintensités de court-circuit, on imagina des *court-circuiteurs* ultrarapides, intervenant en en 2 millisecondes, installés aux bornes des transformateurs.

En 1957, le silicium résolvait définitivement le problème. Ce fut la fin des dynamos avec un rendement de 85 %, alors que l'alternateur couplé au redresseur donnait 92 %. Mais le redresseur provoquait une perturbation sur les réseaux, la génération d'harmoniques, normalement solutionnée par des filtres.

Après 1960, la conception des installations électriques fut adaptée aux redresseurs, en constituant des groupes mis en parallèle pour atteindre l'intensité souhaitée. Un contrôle assez rigoureux de

l'intensité s'avérait nécessaire ; difficile à ces niveaux de courant continu, cette mesure a été assurée par des nouveaux capteurs à effet Hall.

En France, l'usine la plus puissante était au cœur de l'hydroélectricité alpine, à St Jean de Maurienne, 100 000 A en 1960 (za), puis 300 000 A en 1990. C'est maintenant Dunkerque, où la bauxite peut arriver par mer et le voisinage immédiat de la puissante centrale nucléaire de Gravelines, fournissant le kWh à un prix très bas, en raison de son fonctionnement 24h/24, probablement 18 € le MWh. Cette centrale de Gravelines comprend six réacteurs de 900 MW, et l'usine Péchiney, devenue Alcan, puis Rio Tinto, a besoin d'une puissance permanente de 600 MW pour ses 360 cuves de 360 000 A, réparties en six groupes de 66 000 A.



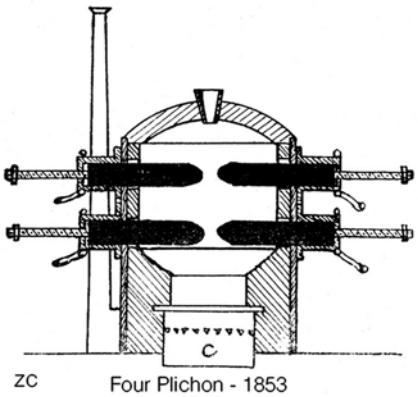
za cuves aluminium 100 000 A à St Jean de Maurienne - Péchiney - 1960

ELECTROMETALLURGIE

Le four à arc électrique

Les précurseurs

L'extrême chaleur de l'arc électrique n'était pas considérée comme trop gênante pour l'éclairage par lampes à arc, environ 200 watts, mais on s'était rendu compte qu'en augmentant l'intensité, on pouvait fondre tout matériau. J. Violle avait déterminé la température de l'arc à 3500° C, celle de la vaporisation du charbon. Nous savons qu'elle est normalement de 5 à 10 000°C dans un four, beaucoup plus haute dans un plasma. L'arc est un conducteur électrique gazeux très particulier, n'existant qu'à haute température. Ses caractéristiques sont décrites dans le chapitre III-1, consacré à son application comme premier moyen d'éclairage électrique.



zc Four Plichon - 1853

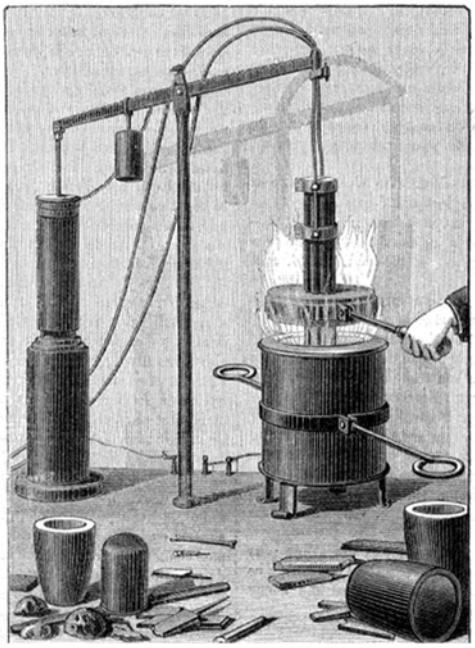
L'un des problèmes de l'arc est son instabilité naturelle provoquant de brèves fluctuations sur la tension du réseau d'alimentation. Il en résulte parfois, au voisinage d'un four à arc, une gêne de l'éclairage électrique, sorte de papillotement, le *flicker*.

En 1853, **Plichon**, préparateur à l'école de Chimie de Paris, prend un brevet :

Applications économiques de la chaleur électrique à la métallurgie. Mais ce n'était pas avec le faible courant des piles que l'on pouvait essayer beaucoup d'applications dans son petit four (zc).

Avec ses premières dynamos, **William Siemens** démontrait en 1880, dans son usine de Woolwich que l'on pouvait fondre, en quatre minutes, 0,5 kg de pièces en acier dans un creuset (zd). Deux nouvelles dynamos Siemens montées *en quantité*, en parallèle, débitaient les ampères nécessaires sous 50 V.

Le dispositif suspendu au fléau de balance, à gauche, est un électro-aimant, ancêtre des systèmes de régulation automatiques, que le suisse Thury mettra au point pour les fours d'Héroult. L'expérience fut renouvelée en 1881 devant des participants au Congrés international des électriciens.

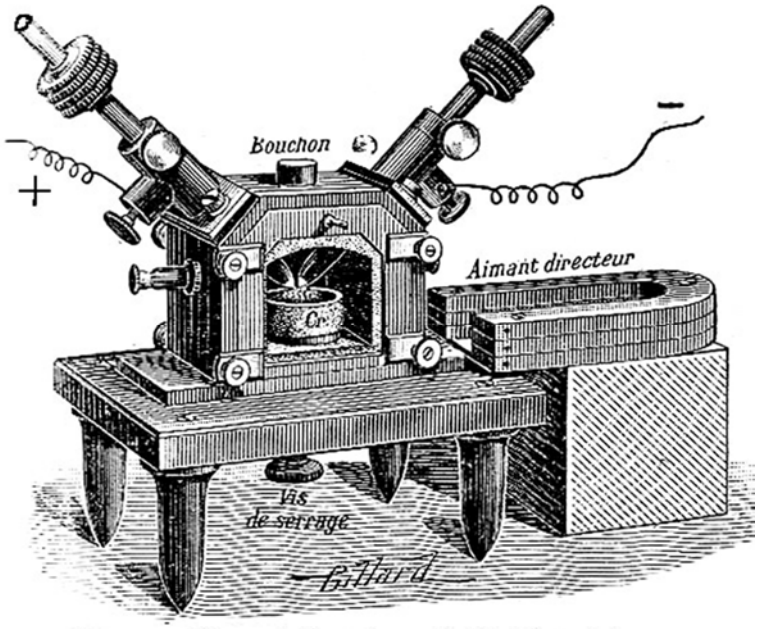


zd Four électrique pour l'acier de William Siemens -1880

Les fours de recherche

Après 1890, les générateurs électriques puissants devenaient disponibles pour les expérimentateurs. Plus d'une dizaine, de tous les pays, explorèrent les possibilités du four à arc. Citons les français, mieux connus.

A. **Minet** concevait en 1891 un four de laboratoire pour la réduction des oxydes ; il fut amélioré par plusieurs chercheurs en Europe et construit par Ducretet (ze)



ze **Creuset électrique de M. Ducretet.**

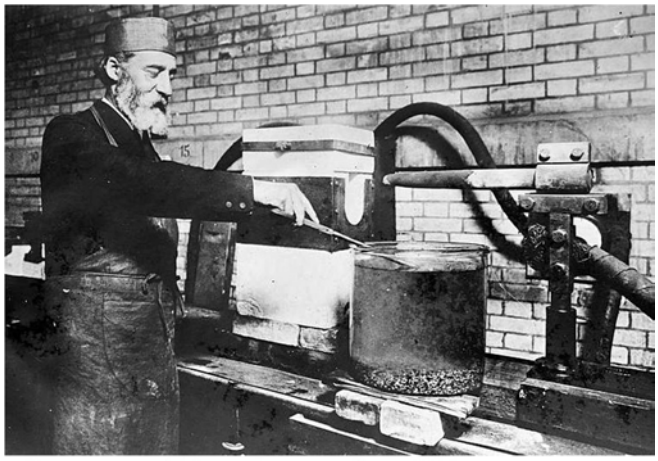
Frederic **Chaplet**, jeune industriel, filateur à Laval, qui avait travaillé avec Moissan, disposait en 1893 dans la Mayenne d'une puissance hydroélectrique de 170 ch, qu'il mettait à la disposition de Moissan. Avec des fours dérivés de celui de son professeur, il ouvrit une voie prometteuse, la fusion par l'arc des oxydes métalliques réfractaires, en présence d'un réducteur.

Pour la confection du four, il cherchait un matériau satisfaisant. Les blocs de carbonate de chaux fondaient, le graphite résistait bien à l'arc, mais le carbone avait trop d'affinité avec les métaux. Alors il fit une *brasque* de charbon mêlée avec la chaux et obtint différents alliages de métaux avec le fer.

Au cours de ces essais, un morceau de revêtement du four tombe dans de l'eau, et dégage une drôle d'odeur. Il soumet la question à Moissan qui identifie l'acétylène.

Il avait synthétisé par hasard du carbure de calcium, le début d'une riche histoire.

En effet, l'un des explorateurs dans cette phase de découvertes fut **Henri Moissan**, pharmacien et chimiste. Il avait mis au point un petit four qu'il transportait dans des centrales électriques, car ce n'était pas à la Faculté qu'il pouvait disposer d'une puissance électrique suffisante (zf)



zf Moissan devant son four - 1884

Développements sidérurgiques

De ces travaux préliminaires se dégageaient les principales pistes que vont emprunter simultanément les développeurs de fours à arc :

– Tout d'abord, la réduction par le carbone des oxydes réfractaires pour obtenir divers métaux spéciaux, chrome, nickel, tungstène, molybdène, vanadium manganèse, silicium, s'alliant au fer pour lui donner des caractéristiques particulières. C'est l'élaboration de ferroalliages.

– La réduction du minerai de fer pour obtenir la fonte comme avec le haut-fourneau au coke. Cette dernière application fut testée par plusieurs métallurgistes. Le four électrique s'avérait capable de remplacer le haut fourneau et fournir un produit de bonne qualité, mais en consommant beaucoup trop d'énergie. Possible dans des conditions économiques rares : charbon cher, électricité abondante à bon marché, minerai proche et très riche.

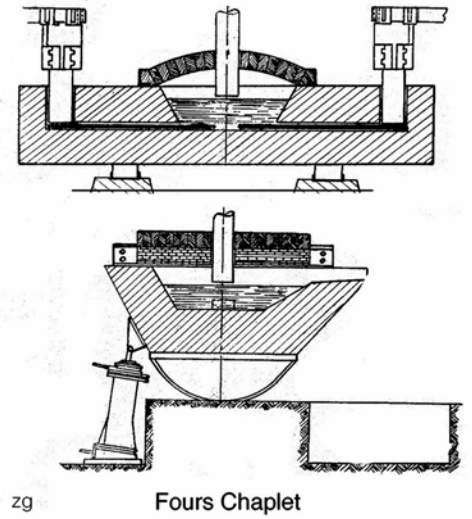
– Fondre des riblons et de la ferraille, puis épuration chimique du bain avec des laitiers synthétiques, mise à la dureté voulue de l'acier par diminution ou adjonction de carbone, alliage avec tous autres métaux.

– Procéder aux mêmes opérations à partir d'une charge liquide fournie par une aciérie classique Bessemer, Martin ou Thomas. Dans ce cas, le four devient un complément très souple pour l'obtention d'alliages particuliers.

Les deux derniers process de métallurgie ou mieux de sidérurgie sont parfois désignés sous le terme d'*aciérie électrique* pour les différencier de la *filière fonte* classique. Ces différentes applications vont mobiliser les développeurs dans tous les pays à partir de 1898. Chacun va concevoir des modèles de fours adaptés à l'une ou plusieurs des applications.

La revue *La Nature* en signalait 35 modèles en 1910.

En France, l'hydroélectricité abondante dans les Alpes fut un facteur favorable au développement du four à arc. Plusieurs métallurgistes en ont été les promoteurs remarqués. Ils les concevaient d'abord pour leur propre usage, certains devenaient aussi fabricants de fours, ou ils concédaient seulement la licence de leur invention.



zg Fours Chaplet

- Chaplet

Il avait commencé à produire des ferro-alliages en 1893, mais ils se carburaient parfois trop sous l'action du charbon de la sole du four. Pour obtenir des alliages à très faible teneur en carbone, il conçut en 1896 un four à sole neutre en magnésie. La liaison électrique avec le bain était établie par une lame de métal identique à celui en élaboration (zg). La dose de charbon à mélanger à l'oxyde pour sa réduction était ainsi facile à doser.

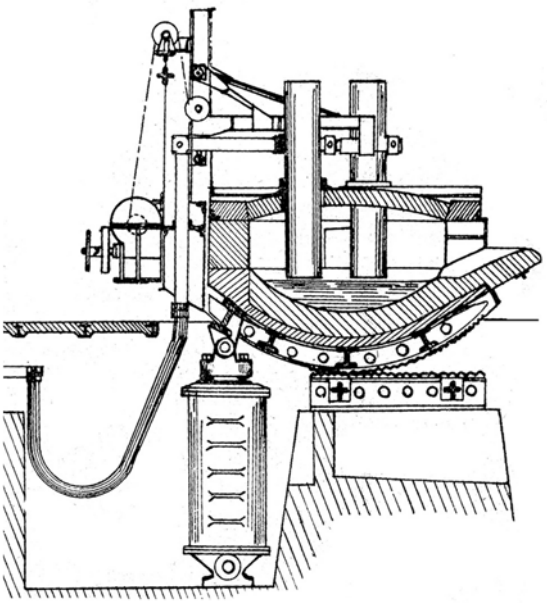
Avec les ingénieurs de la société « *Le Nickel* », il obtint des alliages au nickel et au molybdène.

Ses fours à aciers doux furent utilisés en 1906, avec des adaptations, par Pinat, directeur des *Hauts fourneaux et Forges d'Allevard.*

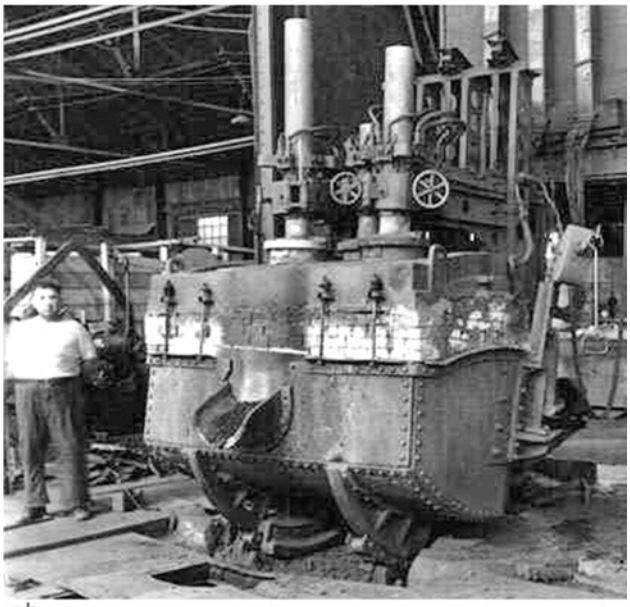
Ils étaient munis d'un système oscillant, facilitant l'évacuation des laitiers. L'un fut aussi installé à La Bathie et un autre à Briansk en Russie.

– Héroult

Ingénieur particulièrement imaginatif et actif, il s'intéressa au four à arc dès que son procédé d'élaboration d'aluminium par électrolyse fut mis au point industriellement à La Praz. Son premier brevet de 12/1898 porte sur le ferrochrome, base de l'acier inoxydable. Il rencontre le même problème que Chaplet, pour obtenir des nuances douces, peu chargées en carbone et applique une solution proche, le remplacement de la sole du four en charbon par de la chromite, dans son cas. Le courant passe alors d'une électrode à la charge conductrice par un premier arc, puis de cette charge à une autre électrode par un second arc en série.



zj Four Héroult



zh Four héroult -1900

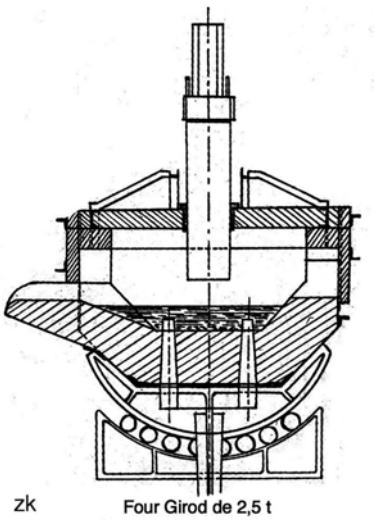
Le four devient basculant en 1901 pour faciliter l'évacuation (zh), (zj). Il met aussi au point un premier système automatique de régulation électrique des électrodes.

Après un voyage à l'arsenal de Turin, où il découvre les essais de Stassano pour réduire le minerai de fer au four à arc, il essaie la même solution ; mais comme d'autres, en particulier Keller, cette utopie de faire un haut fourneau électrique est abandonnée pour son mauvais rendement énergétique. De là il se dirige alors vers *l'acier électrique*, sans partir du minerai, mais de riblons et ferrailles. En 1902, il fait une coulée spectaculaire devant les participants au premier Congrès de Houille blanche, lors de leur visite de La Praz

Mais Héroult n'aspire pas à créer une aciérie électrique, il conçoit et vend des fours toujours plus perfectionnés. Il devient un conseiller métallurgiste apprécié, en particulier aux Etats-Unis.

– Girod

Le parcours inventif et industriel du Suisse Paul Girod commença en 1898 par les ferro-alliages, comme ses contemporains, en utilisant l'énergie hydroélectrique de la papeterie Aubry à Venthon, non loin d'Albertville. Contrairement à Héroult, il s'attache à la création d'un centre métallurgique, plutôt que de vendre des licences de ses différents fours. Pour alimenter ses fours il est à la recherche de fortes puissances électriques en équipant plusieurs chutes, en particulier le lac de la Girotte. A côté de Venthon, il crée à Ugine une aciérie électrique d'aciers fins et spéciaux, la plus importante de France (zk).



zk Four Girod de 2,5 t

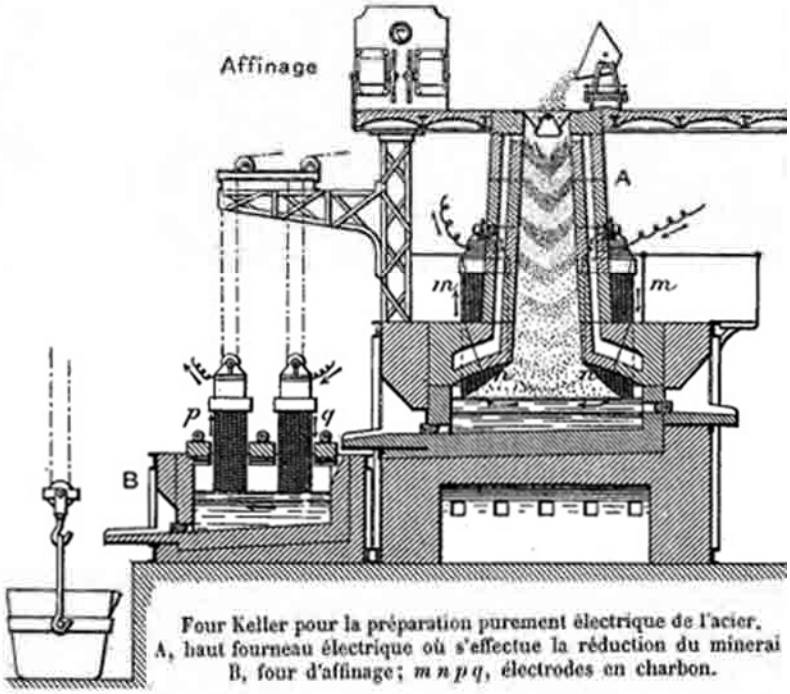
– Keller

C'est dans la vallée de la Romanche, près de Grenoble, que Charles Albert Keller va créer en 1902 son usine métallurgique à Livet. Ses premiers fours à arc avaient été conçus en 1997/98 à Kerousse en Bretagne où il disposait de l'énergie hydroélectrique d'un petit barrage sur le Blavet. Ils figurent sur la première page de ce chapitre.

Il ne s'intéressa pas comme les autres aux ferroalliages, ni au perfectionnement d'un seul type de four pour une opération particulière. Il testait nombre d'améliorations et solutions parfois originales, en complément de ce que ne pouvait pas réaliser la sidérurgie traditionnelle. Ainsi, il travaillait en collaboration avec les aciéries traditionnelles, Jacob Holtzer d'Unieux, Stum de Neunkirchen, Burbach, Jeumont.

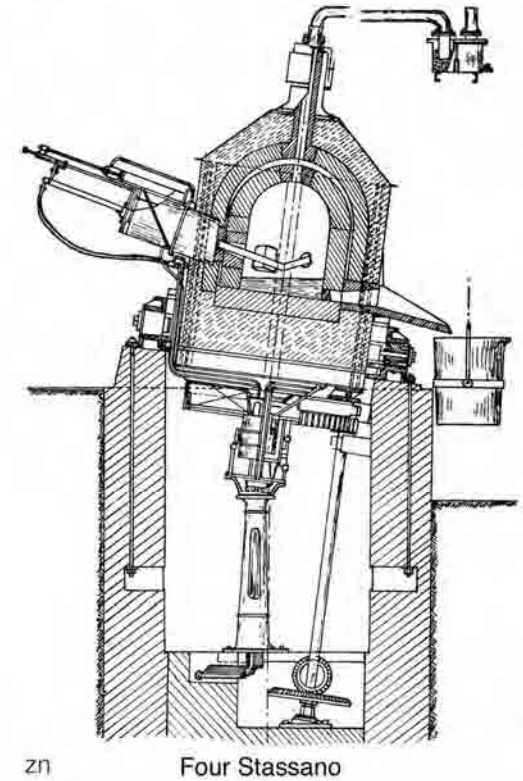
Au cours de WW1, les principales aciéries françaises étant occupées, il mit au point un procédé assez simple de fonte synthétique, élaborée à partir des tonnes de déchets ferreux d'usinage produits par les usines d'armement.

zl Généraux en visite chez Keller à Livet -1916



Four Keller pour la préparation purement électrique de l'acier. A, haut fourneau électrique où s'effectue la réduction du minerai B, four d'affinage; *m n p q*, électrodes en charbon.

zm



zn Four Stassano

Cette fonte de qualité quelconque était ensuite coulée en obus du gros calibre de 220.

Keller explora la possibilité d'obtenir la fonte par réduction du minerai, comme Héroult et Stassano. À la sortie du four, il ajoutait un four auxiliaire d'affinage pour obtenir de l'acier à la nuance souhaitée. (zm)

Stassano

Ce capitaine d'artillerie italien commença, lui aussi en 1898, ses recherches sur la réduction au four électrique des minerais de fer assez riches exploités dans les îles italiennes. Son appareil le plus élaboré avait trois électrodes en triphasé, l'axe vertical était légèrement incliné et la mise en rotation améliorait le brassage du bain (zn). Comme les autres audacieux électro-sidérurgistes, il abandonna en 1908 ce développement, et après suppression de la rotation inutile et compliquée, il se tourna vers l'affinage des riblons et de la fonte. Son four fonctionna en Italie, Angleterre et Allemagne.

Soudure par l'arc électrique

zn2 Soudure à l'arc électrique

La très forte température de l'arc étant capable de fondre facilement l'acier, il était logique de cherche à concevoir un arc portatif pour l'approcher manuellement de l'objet à fondre seulement en un point, par exemple pour trouer une plaque ou souder deux pièces entre elles. Avant l'apparition des fours puissants, en 1885, le Russe Bernados proposait dans un brevet d'amorcer un arc entre la pièce à souder et une électrode portative en charbon.

Le résultat était mauvais, car l'acier fondu se carburait et la soudure était fragile au choc. Un autre Russe, Slavianov, remplaça tout simplement, en 1888, l'électrode mobile, la baguette de charbon, par une tige de fer dont la fusion constituait la soudure.

L'alimentation électrique nécessitait une forte intensité, très variable avec une tension réduite. Elle était obtenue, soit en courant continu avec une dynamo en parallèle avec une batterie d'accumulateur, soit de préférence en alternatif avec un transformateur à circuit magnétique ouvert, éventuellement variable (zn2).

Le procédé se généralisa, s'améliora jusqu'à remplacer les rivets, seul système connu d'assemblage définitif, si ce n'était le traditionnel martelage des deux pièces en fer chauffées au rouge par le forgeron. En 1919, la SAF, *Soudure Autogène Française* construisit aux chantiers navals de Caen un premier bateau atelier, entièrement soudé à l'arc. Mais les assureurs et armateurs restaient sceptiques sur l'étanchéité et la résistance mécanique des coques.

Soudure par résistance

On avait constaté qu'en rapprochant les extrémités de deux fils électriques sous tension, les extrémités rougissent et finissent par se souder. L'Américain Elihu Thomson avait fait une conférence remarquée sur ce type d'assemblage en 1887.

La méthode consiste à mettre en contact les deux pièces à souder et faire passer un courant de forte intensité au point de contact, chacune des pièces étant reliée à l'alimentation électrique. Il se développe rapidement une forte température au point de contact résistant qui fond et soude les deux pièces.

Le procédé doit son succès à son aptitude à l'automatisation. Depuis un demi-siècle, les éléments de carrosserie des autos sont assemblés avec des centaines de *points de soudure* effectués par des machines automatiques ou robots de *soudure par points*.

ELECTROCHIMIE À HAUTE TEMPÉRATURE

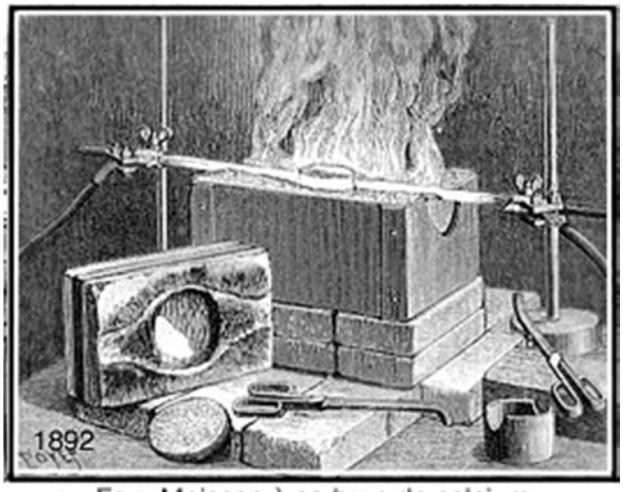
Carbure de calcium et acétylène

L'usage du four à arc ne se limitait pas à des applications métallurgiques. Celles-ci ont d'ailleurs été précédées par une application particulière, dont l'importance a été très remarquable à ses débuts et a perduré encore jusqu'aujourd'hui : le carbure de calcium, CaC_2.

Il est probable qu'Henri Moissan a été conduit à ses travaux sur le carbure par le morceau de four que Chaplet lui avait donné pour examen, comme relaté ci-dessus. Les seuls matériaux constituant les fours de ces deux chercheurs étaient la chaux et le graphite des électrodes d'arc. Il était donc inévitable qu'en présence de l'arc, ces deux matériaux fusionneraient.

Moissan, professeur et chercheur présentait une note à l'Académie le 12/12/1892 sur l'élaboration de carbure au four à arc, à partir de chaux vive et de carbone. Il avait déjà synthétisé d'autres carbures, mais celui-ci avait l'avantage de dégager l'acétylène par hydrolyse. Ce gaz préparé par Wöhler et Berthelot, en 1862, dégageait la plus forte chaleur en brûlant à l'air, accompagné surtout d'une belle et forte lumière blanche, bien plus éclairante que celle du gaz, ou de la lampe à incandescence.

Moissan fut ainsi le pionnier de la chimie à haute température à l'aide de fours relativement simples (zo). Il l'explique :



zo Four Moissan à carbure de calcium

C'est au moyen de cet appareil que nous avons pu, grâce à une élévation de température suffisante, réaliser la reproduction du diamant, la cristallisation des oxydes métalliques, la réduction d'oxydes regardés jusqu'ici comme irréductibles, la fusion des métaux réfractaires, la distillation de la chaux, de la silice, de la zircone et du charbon, enfin la volatilisation abondante des métaux tels que le platine, le cuivre, le manganèse, le fer, l'aluminium et l'uranium. Certains que l'on ne pouvait pas amener même à l'état de fusion, comme la magnésie, le tungstène, le molybdène, peuvent prendre dans le four électrique l'état gazeux. La mise en marche de notre appareil est des plus simples. Le courant est amené par deux câbles souples aux électrodes de charbon, dont le diamètre grandira avec l'intensité de la dynamo. On établit le contact, l'arc jaillit, et, en reculant plus ou moins l'électrode, on donne à cette puissante étincelle une longueur constante qui dépend de la puissance électrique et de la conductibilité des vapeurs métalliques qui emplissent le four.

Simultanément aux Etats-Unis, Thomas L.Willson faisait par hasard la même découverte. Il cherchait à produire de l'aluminium au four par mélange de chaux, charbon et alumine. Ce qu'il obtenait n'étant pas ce qu'il cherchait, il le jette dehors. Quelques heures plus tard, il pleuvait, et un ouvrier laisse tomber sur les détritus son allumette pas éteinte, les déchets flambent. C'était de l'acétylène, produit par réaction de l'eau sur le carbure.

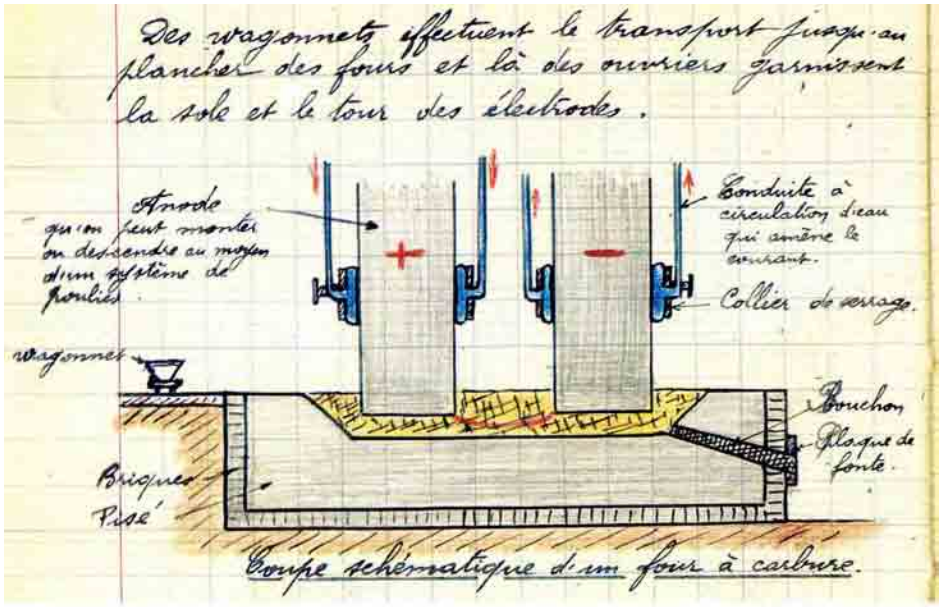
Au cours des années suivantes, Willson vendit son brevet à un syndicat qui deviendra l'*Union Carbid*e, puis partit au Canada pour fonder la *Willson Carbide Company* à Meritton.

Les affaires de l'homme qui **changeait *l'eau en lumière*** ont ensuite bien prospéré conjointement par le développement de sites hydroélectriques indispensables pour l'élaboration du carbure de calcium.

Bien que l'éclairage électrique soit largement diffusé dans ces années 1890, il y avait des besoins d'éclairage dans tous les lieux isolés sans électricité. Le prix de revient du carcel/heure avec l'acétylène était le plus bas, 3 fois plus faible que la lampe à pétrole ou l'électrique à incandescence. Certains songèrent à remplacer l'éclairage au gaz de houille classique par l'acétylène. En effet 1 tonne de carbure équivaut à 15 tonnes de charbon pour l'éclairage, mais celui-ci produit le coke capable de chauffer en particulier les hauts fourneaux.

Mais cette seule utilisation de la lampe à carbure, *changer l'eau en lumière,* ne suffit pas à expliquer la véritable ruée des industriels vers les sites à équiper pour la production hydroélectrique et son exploitation sur place, pour élaborer du carbure. Elle pouvait s'expliquer par la banalisation des générateurs électriques de forte puissance, aussi par les espoirs que suscitaient ces nouvelles industries de l'électrochimie-électrométallurgie à haute température, exploitation l'abondant potentiel hydraulique.

La raison principale était que la fabrication du carbure au four à arc était bien plus facile que les applications sidérurgiques décrites précédemment. La construction du four ne présentait pas de difficultés techniques, une cuve en matière réfractaire avec un trou à la partie inférieure, à déboucher pour la coulée. Le remplissage était un mélange adéquat de chaux vive et de coke ou mieux charbon de bois, produits facilement disponibles. Au-dessus, l'arc brûlait entre deux électrodes en carbone.



zp Four à carbure -1946 - Ecole primaire de Livet - M. Bellon

Ainsi, dans la vallée alpine de la Romanche, bourdonnante d'industries alimentées par l'hydro-électricité, les enfants de l'école du village de Livet apprenaient leur futur métier de conducteur de fours à carbure (zp), bien que ce n'était pas au programme du ministère.

Premières usines

Tous les pays possédant des ressources hydroélectriques ont participé à ce rapide développement. À partir de 1896 le carbure était fabriqué en Amérique à Spray par l'*Electric gas Company*, en Allemagne par la *Carbid*, en Suisse par l'AIAG à Neuhausen en parallèle avec l'aluminium et à Vallorbe avec les chlorates.

En France, ce fut le début du fort développement de l'électrochimie - électrométallurgie dans les vallées alpines. En 1896, l'électrolyse de l'aluminium ayant été transférée de Froges à La Praz en Maurienne, la SFEM y remplaça les *marmites* par des fours à carbure. En 1897 la Société des Carbures Métalliques, SCM, démarrait une première usine de carbure de calcium à Notre Dame de Briançon en Tarentaise. Suivit une usine à Séchiliennne, première implantation électrochimique en Romanche. L'année suivante une nouvelle Société électrochimique de la Romanche commençait aussi la production de carbure à Livet.

L'élan était donné, mais sera d'abord freiné par un problème de brevet et une surproduction, puis enfin relancé par la découverte progressive de nouvelles utilisations de l'acétylène.

Les brevets

Il a été noté comment fut découvert le carbure en France, suite à l'envoi par Chaplet à Moissan d'un morceau d'un matériau insolite. Ces deux chercheurs collaboraient, Chaplet mettant la puissance de son usine de Mayenne à la disposition de Moissan. Un aide du professeur exécutait ces expériences, Louis, Michel Bullier.

Ce dernier pressentait comme d'autres que l'acétylène pourrait être intéressant pour remplacer le gaz d'éclairage et deux ans après sa découverte décidait de breveter cette invention du carbure. Il s'en ouvrit à Moissan, qui doutait de l'intérêt de sa découverte, comme presque tous les découvreurs. Et puis, Moissan appartenait à cette rare catégorie de chercheurs qui considéraient que sa rémunération de professeur et les moyens mis à sa disposition par l'université lui suffisaient pour vivre, et que les résultats de son travail appartenaient à la société.

Il ne s'associa pas à Bullier, qui en 1894 et 1895 prit huit brevets sur la fabrication du carbure et son utilisation comme moyen d'éclairage. Pendant deux ans plusieurs autres sociétés dont la Société des Forces motrices du Grésivaudan, la Société du Carbure de calcium, ne tenaient pas compte de ce brevet, tant il était évident qu'il était antériorisé par les travaux et communications de Moissan à l'Académie. Elles attaquèrent en nullité le brevet Bullier et sa société SCM fit de même en plaidant la contrefaçon. Ce n'est qu'en 1901, après plusieurs arrêts judiciaires que Bullier gagna, son brevet de base étant reconnu valable, et en 1903 sur les contrefaçons.

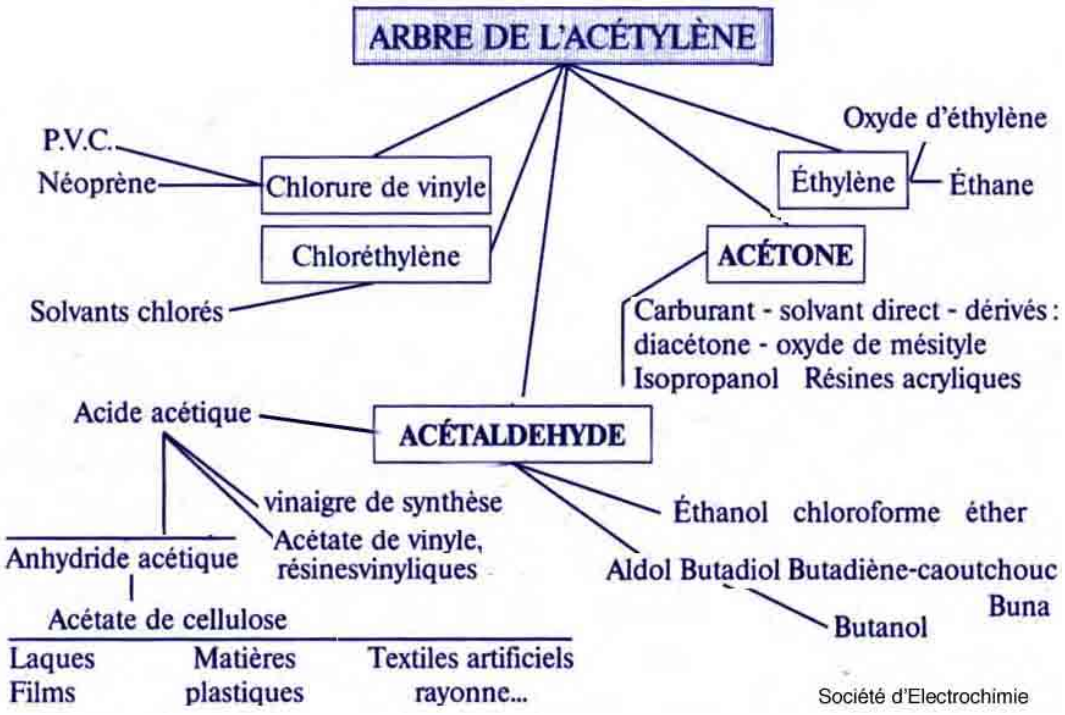
À ces querelles de brevet se superposa une crise de surproduction qui culmina en 1901 ; la production française avait atteint 40 000 t, pour une consommation de 12 000 t. Tout le monde se lançait dans la fabrication du carbure, souvent à titre de complément d'autres activités électrométallurgiques pendant les périodes de hautes eaux, en début d'été. Mais les débouchés restaient limité à l'éclairage. Un consortium des fabricants français de carbure se constitua pour tenter de réguler prix et volume de production. Une certaine reprise s'amorça après 1903. Une nouvelle société s'était constitué, la Compagnie Universelle d'Acétylène, la CUA, qui souhaitait obtenir une licence de la SCM, elle même liée à la Société d'Electro-Chimie, la SEC. La CUA installait dans la Romanche deux centrales, les Clavaux, puis les Roberts et perdura jusqu'en 1983 sous le nom de CUAEM (zr).

En 1909 le brevet Bullier expirait, ouvrant ainsi le marché français à la concurrence étrangère, laquelle avait aussi constitué un Syndicat européen entre la Norvège, l'Allemagne, la Suisse et l'Autriche. Les prix chutèrent un peu et furent régulés en 1910 par un nouveau Syndicat européen regroupant les 57 usines de production.

Un avenir florissant s'ouvrait pour le carbure.

L'acétylène, nouvelle matière première (zs)

En une dizaine d'années, ce gaz trouva nombre d'applications, bien au-delà de l'éclairage des villes en remplacement du gaz, comme certains l'espéraient.



– L'acétylène se révéla une matière première de la chimie pour produire l'acétone, l'acétaldéhyde et leurs multiples dérivés, en particulier les matières plastiques, PVC, caoutchouc synthétique etc. Depuis les années 1960, l'acétylène n'est plus produit à partir du carbure, mais du pétrole.

– Le **chalumeau oxyacétylénique** a son origine dans une communication à l'Académie de H.Le Chatelier en 1895. Il y expliquait la très forte température de combustion de l'acétylène avec l'oxygène, largement suffisante pour fondre l'acier. Pour transporter ce gaz explosif, G.Claude le dissolvait dans l'acétone. En 1901, Charles Picard inventait le chalumeau à haute pression, alimenté par des bouteilles d'acétylène dissous et d'oxygène comprimé, et en 1903, Le Chatelier fondait la *Soudure autogène française.* C'était une véritable révolution pour la construction mécanique où l'assemblage des pièces d'acier se faisait exclusivement par rivets, auparavant par martelage chez le forgeron. La Tour Eiffel assemblée avec 2 500 000 rivets aurait gagné 10 % de poids et une meilleure résistance.

Il faut aussi rappeler que ce chalumeau est encore aujourd'hui le seul moyen capable de démolir, c'est-à-dire découper en morceaux, les importantes structures métalliques, navires ou autres. Ces tonnes déchets sont refondus dans les fours d'électrométallurgie.

– La **cyanamide calcique**

En 1917, par crainte de ne plus pouvoir importer du Chili le nitrate, élément essentiel des explosifs, le service des Poudres fait produire par les usines alpines de la cyanamide, d'où l'on peut extraire le nitrate. Elle-même est obtenue par fixation d'azote sur le carbure. L'azote étant obtenu à partir de l'air liquide par le procédé de G.Claude. De plus, c'est la base d'un engrais azoté.

zq Usines électrométallurgiques - Alpes du Nord

Compléments

–Galvanoplastie :

LOUIS FIGUIER, *Les Merveilles de la Science* T. 2 p. 285- 380, ed. Fourne et Jouvet Paris -1868.

HENRI DE GRAFFIGNY, *Guide pratique de l'électrochimiste,* ed. Bernard Paris 1896.

– Aluminium :

*La lumière électrique - La Nature,*1887-1888-1889… , cnum.cnam.fr

A. MINET, *L'aluminium, fabrication, emplois, alliages*, 1904

RAOUL BLANCHARD, *L'électrométallurgie et l'électrochimie dans les Alpes françaises,* Revue de géographie alpine, vol 12, n°3, p.375, 1924.

Hall : *Production of Aluminium Metal by Electrochemistry*, A National historic chemical Landmark, American Chemical Society, Oberlin, Ohio, 17/09/1997

C.G. GIGNOUX, *Histoire d'une entreprise française*, Hachette 1955

PAUL MOREL, *Histoire technique de la production d'aluminium,* PUG Grenoble 1991

L'Institut pour l'histoire de l'aluminium, IHA, Clichy, a regroupé un important fond documentaire et édite les : Cahiers pour *l'histoire de l'aluminium*. (48 n°) histalu.orgÉlectrométallurgie :

H.BOURDON, *Aciéristes et Fondeurs*, Dunod, Paris, 1957.

Archives de Ecole Nationale Supérieure d'Electrochimie et d'Electrométallurgie de Grenoble

0- Photos de la 1e page du chapitre

Dessins originaux, inédits, au lavis, de fours Keller. Extraits du tableau, large de 3 m, représentant 10 gravures de fours, resté accroché pendant 40 ans dans le bureau directorial de A.Keller à Livet. J'ai retrouvé ce tableau unique en 1990 dans un tas de déchets du bâtiment administratif, abandonné depuis des années. Il a été confié d'abord à l'ENS-EEG, puis au Musée de la Chimie à Jarrie, attendant son retour à son lieu d'origine, en Romanche, à la centrale de Livet à requalifier en musée Keller de l'électrométallurgie alpine. Reproduction autorisée avec mention : coll. *André Ducluzaux*.

1 - La ***galvanoplastie*** est le procédé utilisant le passage d'un courant galvanique dans une cuve d'électrolyse, permettant de déposer sur une électrode un métal sous forme d'un mince film souple (*plastique*) détachable. Il n'a aucun rapport avec Galvani, comme le courant, celui-ci étant mort avant l'invention de la pile de Volta, donc la découverte du courant électrique.

De même les phénomènes électriques étaient regroupés dans le *galvanisme* entre 1800 et 1820 (Ampère). Sans doute pour honorer Galvani dont les découvertes ont induit directement celle de la pile de Volta.

Par extension, on désigne parfois aussi par galvanoplastie les dépôts adhérents de métaux par électrolyse dont le rôle est un simple revêtement. Par généralisation, on désigne aussi par *galvanisation* à chaud le dépôt de zinc par trempage à chaud (450°), sans intervention de l'électricité ; par contre le dépôt électrolytique de zinc est dénommé avec exactitude, électrozingage. et non galvanisation à froid.

2 - Un anglais inconnu **Spencer** est parfois cité comme ayant découvert la galvanoplastie presque simultanément avec Jacobi. C'était 7 mois plus tard en 1839, après la publication de Jacobi à l'Académie. Il n'est plus ensuite apparu dans le domaine électrique.

3 - Les **dépôts électrochimiques** étaient aussi dénommés argenture ou dorure galvanique ou parfois voltaïque. Figuier raconte l'histoire de la *dorure et argenture voltaïque* en citant le texte du brevet d'Elkington décrivant l'effet de *courants galvaniques*.

La longue controverse entre Galvani et Volta se prolongeait encore dans la sémantique.

4 - Cette **laborieuse invention** de l'aluminium, comme bien d'autres, apparaît comme un long chemin semé d'embûches techniques et d'obstacles financiers, entre le principe décrit dans le brevet et la réalisation d'une machine opérationnelle. Nos contemporains ont toujours tendance à croire qu'un **brevet** seul a une grande valeur intellectuelle comme financière.

Il ne l'acquiert que lorsque l'inventeur, devenu *développeur* (cf. Au lecteur) a réussi à réaliser et faire fonctionner industriellement cette machine ou ce procédé.

Nombre d'exemples décrits dans ce livre (Edison, Bell) y ajoutent la nécessité de bons conseils juridiques, tant à la rédaction du brevet, qu'à sa défense devant les tribunaux.

5 - Calypso : Dans son livre, *Histoire d'une entreprise française*, J. Gignoux explique ce nom : « *On ne sait pourquoi l'amante désolée du subtil Ulysse avait donné son nom où s'élevait cette usine infortunée : le* lieu-dit *s'appelait en réalité de façon beaucoup moins élégante, les* Gorrets *; il semble qu'un précédent propriétaire, sans doute humaniste, avait eu l'idée de cette poétique mutation. »*

6 – Mémorial de la Société d'Électro-Chimie, Association amicale des anciens de l'Électro-Chimie, éditions Lyonnaises d'Art et d'histoire, 419 p., 1991. Livre très documenté et bien structuré.

FIN du Tome III

Bibliographie, webographie

Celle relative à un chapitre figure dans les Compléments, en fin de chaque chapitre.
La 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-decouvreurs-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 des extraits de chaque tome sur le site web :

ÉLECTRICITÉ – DÉCOUVREURS – INVENTEURS
electricite-decouvreurs-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- Électrochimie –Électrométallurgie

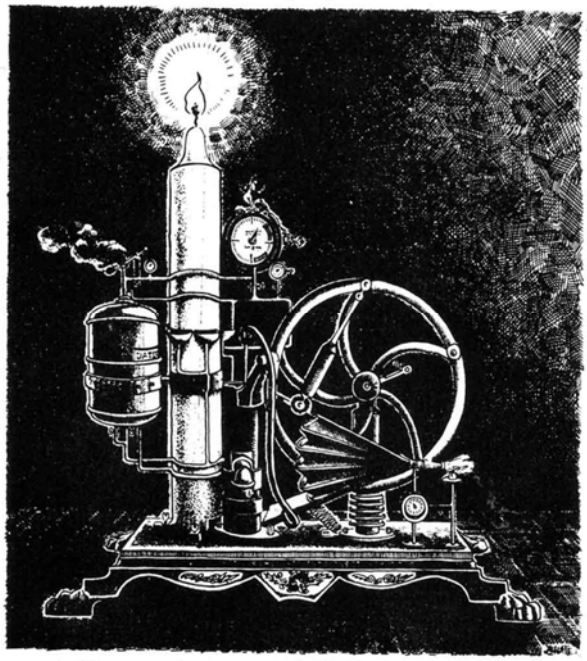
IV–Vecteur d’énergie

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

ce n'est pas en perfectionnant
la bougie

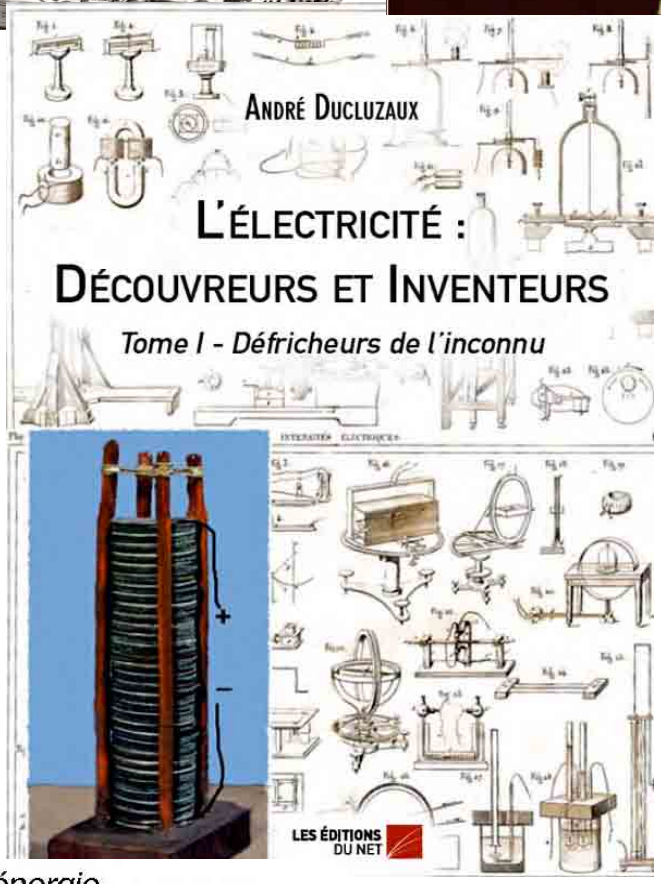


que l'on a inventé l'électricité

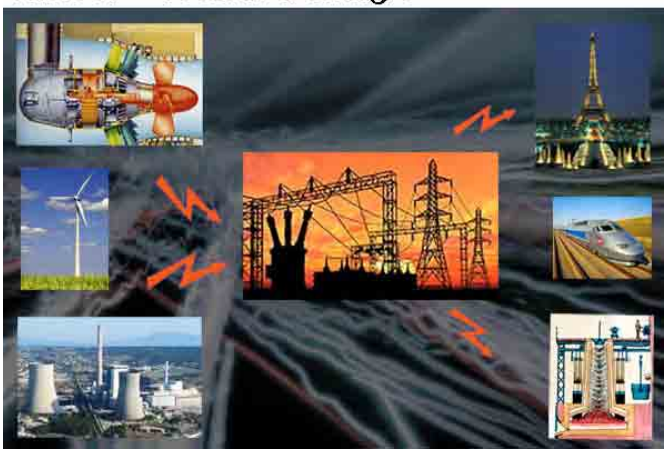
Les 5 tomes

Tome II - Générer l'électricité

Tome III - Et la lumière fut - Électrochimie



Tome IV - Vecteur d'énergie



Tome V - Vecteur d'information

Achevé d'imprimer en novembre 2014 par LEN S.A.S. – 92150 Suresnes
Dépôt légal : novembre 2014
Imprimé en France