

ANDRÉ DUCLUZAUX

L'ÉLECTRICITÉ DÉCOUVREURS ET INVENTEURS

Tome III - Et la lumière fut - Électrochimie

Fiat lux



André Ducluzaux

L'électricité

Découvreurs et Inventeurs

Cent aventures de
physiciens, autodidactes,
ingénieurs, techniciens

Tome III

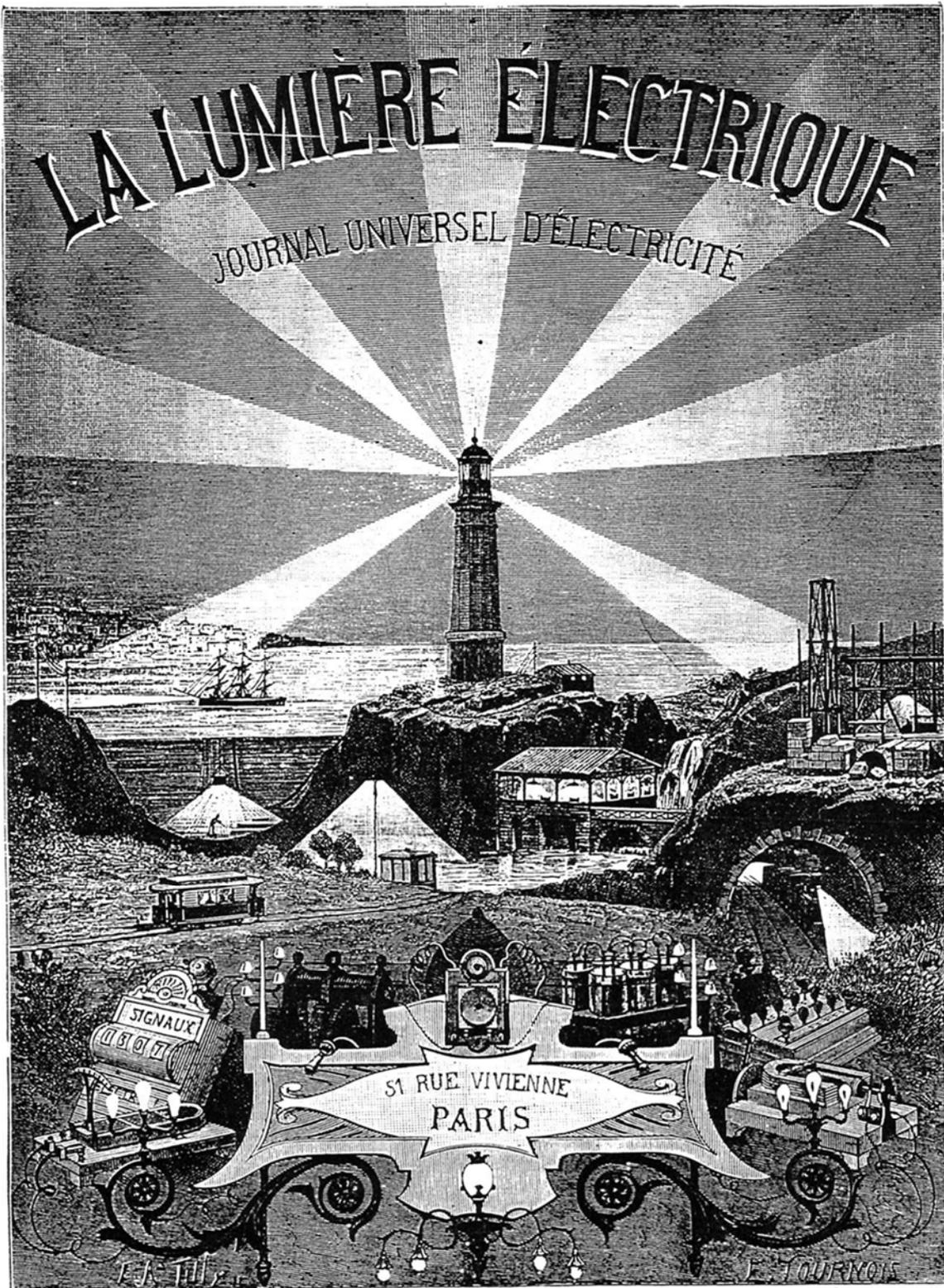
Et la lumière fut

L'électrochimie

LES ÉDITIONS DU NET
22 rue Édouard Nieuport 92150 Suresnes

LA LUMIÈRE ÉLECTRIQUE

JOURNAL UNIVERSEL D'ÉLECTRICITÉ



Sommaire

Et la lumière fut – L'électrochimie

EXTRAITS

– *Fiat Lux*

1 – Lampe à arc électrique

L'arc électrique. Les régulateurs. Éclairage des phares.

En 1876, l'électricité-énergie en quantité. La bougie Jablochhoff.

Arc ou incandescence.

2 – Lampe à incandescence

Les précurseurs. Problèmes de conception. La lampe Swan.

La lampe Edison. La lampe Maxim. La lampe Lane Fox.

La lampe Sawyer. En résumé.

3 – La lampe à décharge

Les premières lueurs. Apparition progressive de lampes à décharge : à vapeur de mercure, au néon, à vapeur de sodium, le tube fluorescent, lampe aux halogénures, fluocompact.

4 – L'exposition de Paris 1881

L'exposition. Salles de la galerie. L'éclairage électrique.

Théatrophone. Locomotion électrique. Congrès international des électriciens.

La grande machine Edison. Jury des prix et bilan.

5 – Développements de l'éclairage

La puissante campagne publicitaire Edison. Après l'exposition : Edison,

Swan, Maxim, Lane Fox. Installations privées d'éclairage,

Centrales collectives : Etats-Unis, Allemagne, France, Paris,

Angleterre, Italie, Europe. La force motrice. Vers la lampe moderne.

6 – Electrochimie, Electrometallurgie

Lois de Faraday. L'électrochimie à basse température, électrolyse,

galvanoplastie, dépôts métalliques. À haute température, électrolyse

de l'aluminium, Héroult, Hall. Electrometallurgie, fours à arc.

Quelques unes des 130 pages.....

Fiat Lux

Depuis l'apparition de l'espèce humaine, chaque soir au coucher du soleil, les hommes semblaient 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 portable, 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

Pages 12 à 25 non reproduites

Suite .../...



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.

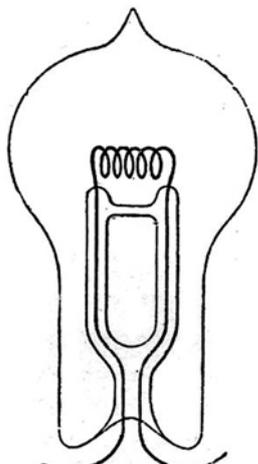
Son développement a suivi les phases classiques des inventions :

- 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 mouvementée 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.

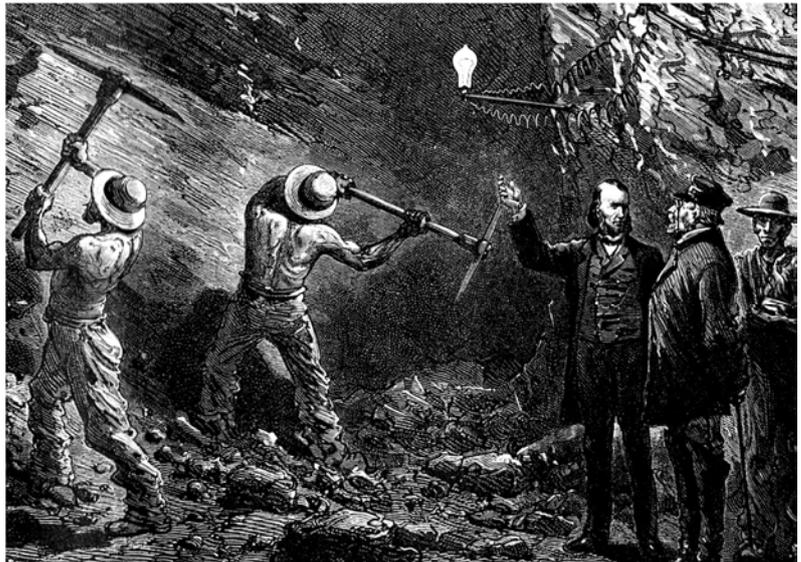
Les précurseurs

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 Staitte 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 constituant 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 à 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.

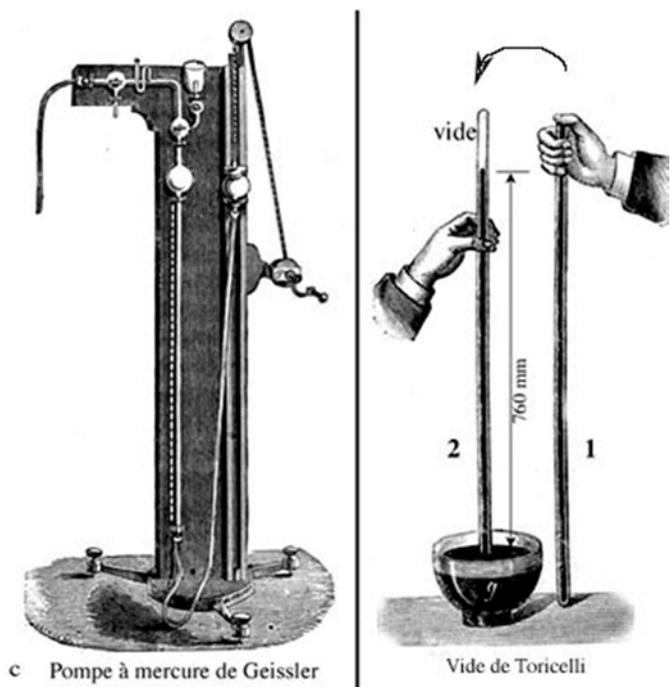
Le platine, seul métal connu à haut point de fusion, près de 2000° C avait une résistivité faible et même avec une section minimale et une grande longueur, enroulée en spirale, il ne permettait que des lampes sous une ou deux dizaines de volts, qu'il faudrait mettre en série pour arriver vers 100 volts,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

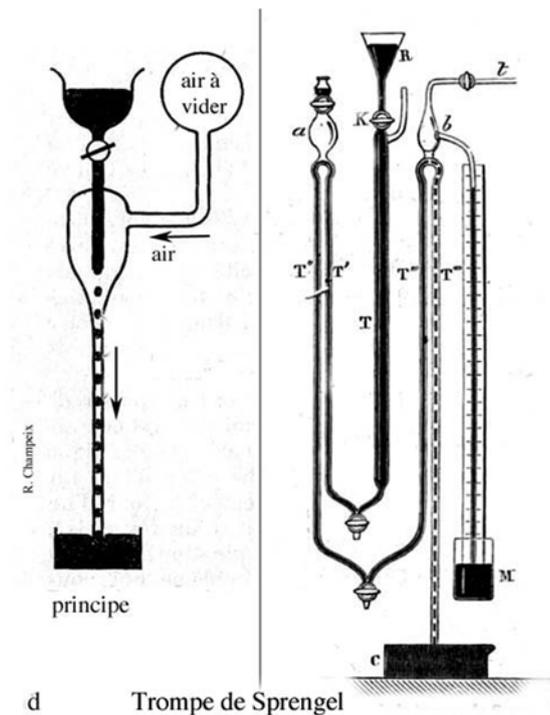
Un vide profond était impératif pour éviter la combustion des filaments, mais l'ancienne pompe mécanique à pistons, dite pneumatique, ne faisait qu'un vide très imparfait d'un torr (ou mm de mercure).



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



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 Alvergnyat, 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 *cassent* ce vide.

Ce phénomène inconnu fut difficile à comprendre, 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 Alvergnyat 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 dépose 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 Gaîté. 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.

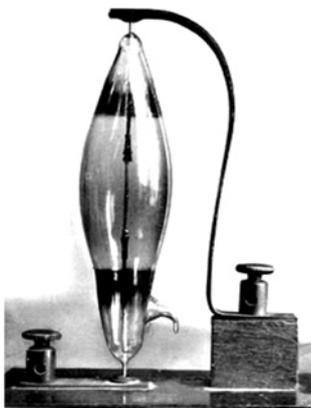
Il associe à son projet un souffleur de verre Fred Topham (d2). Des difficultés se présentent pour le raccordement du filament de carbone avec les fils d'amenée du courant en platine, scellés dans le verre.

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

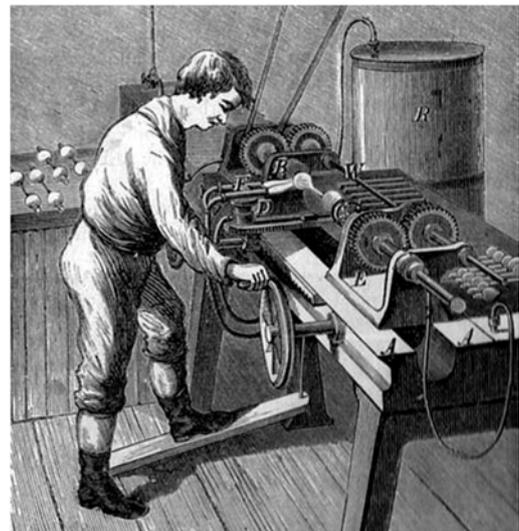
« *I have just solved the problem of the subdivision on the electric light indefinitely* ».

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



d2 Machine à souffler le verre des ampoules

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.

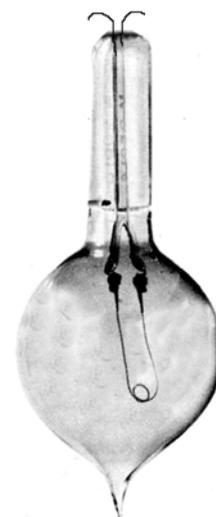
L'année 1879 sera alors consacrée à deux autres problèmes.

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. Gimmingham

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, Gimmingham prend en charge l'adaptation des accessoires et le frère Alfred Swan conçoit la douille support.

Pages 32 à 45 non reproduites

Suite .../...



PHÉNOMÈNE ÉLECTRIQUE
DE L'ATMOSPHÈRE : AURORE BORÉALE .

Imp. Lemercier et C^o Paris

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 inexplicable 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.

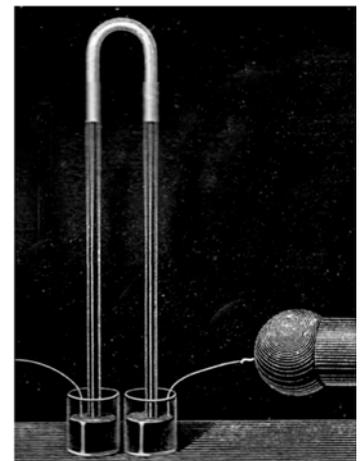
La lampe à arc, premier système d'éclairage, n'est en fait qu'un cas particulier de lampe à décharge, où l'arc électrique se développe librement dans l'air et à la pression normale. Son importance dans l'histoire nécessitait une place particulière (III-1). Dans toutes les autres lampes à décharge à venir,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

Les premières lueurs

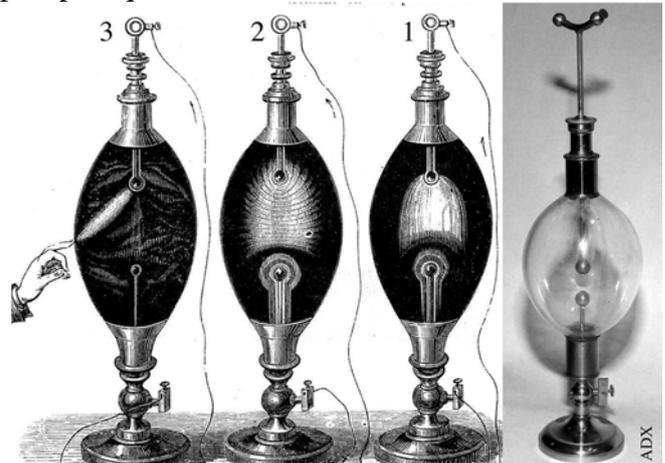
L'histoire commence donc avec l'anglais **Hawksbee** qui constatait en 1709 une étrange lueur mauve dans tube contenant du mercure, excité avec la première machine électrostatique à frottement (I-2). **Davy**, vers 1800, obtenait aussi cette lueur dans le vide barométrique d'un tube en U, haut de plus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

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*,

L'anglais **Gassiot**, l'allemand **Plücker** et d'autres repriront 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



Lueur dans le vide barométrique

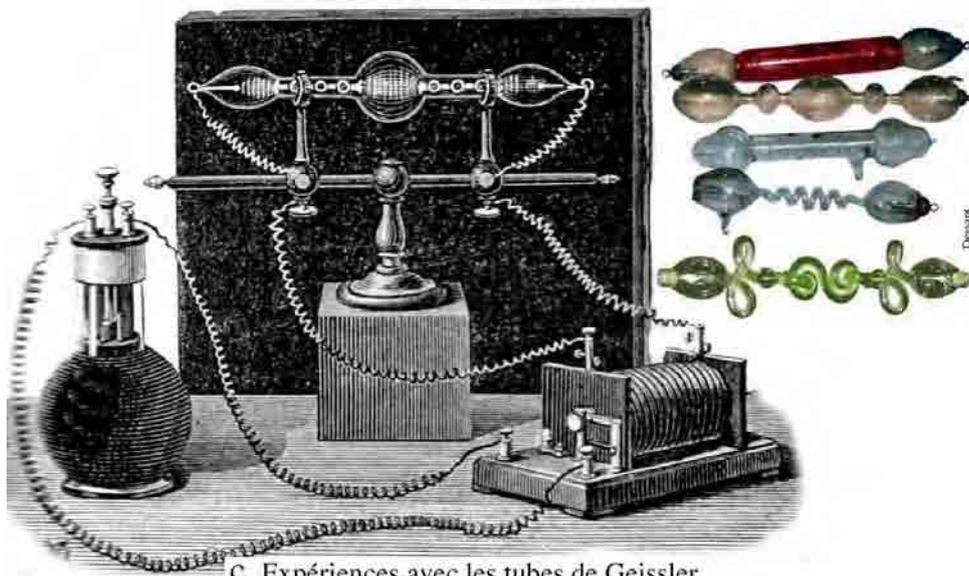


b décharges lumineuses dans l'oeuf électrique

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 fabricant 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

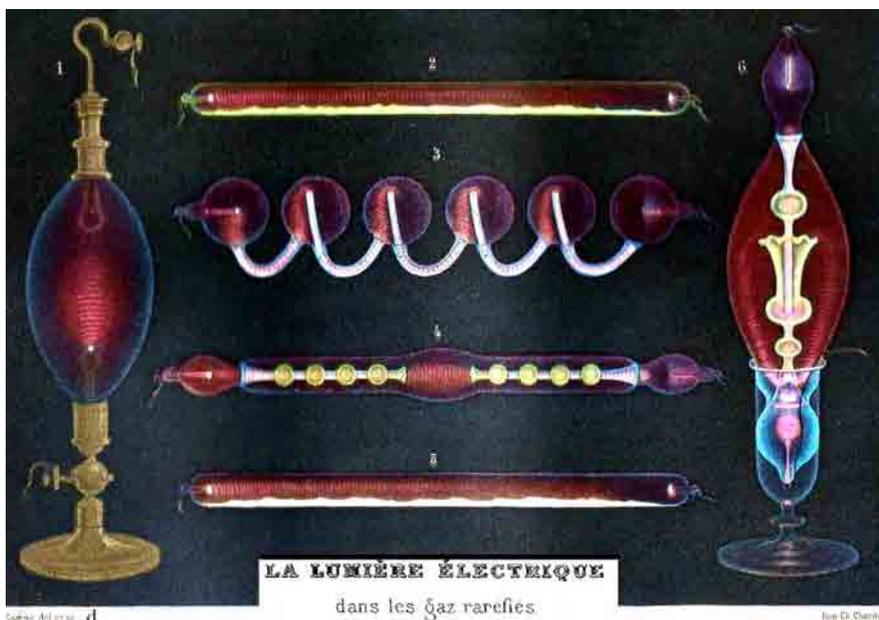
abaissait alternativement, le mercure constituant un piston pratiquement sans fuite. Elle permit aux inventeurs de lampe à incandescence de progresser, en descendant le vide à un millième de torr.

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).

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.

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.

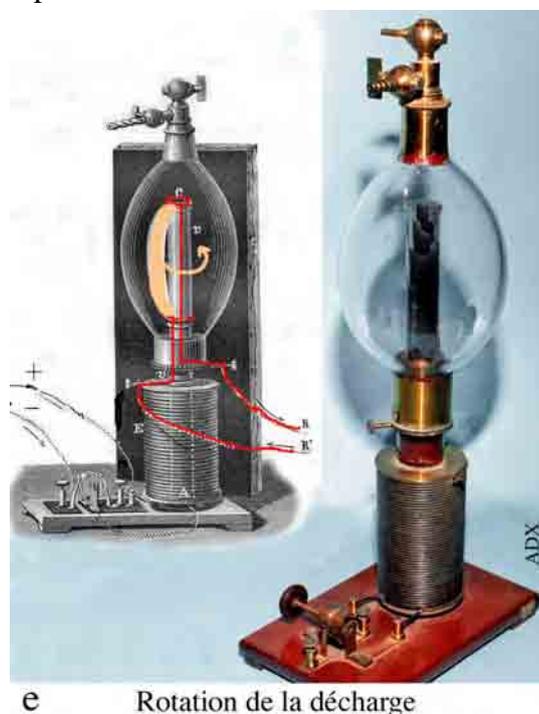
Sprengel inventait en 1865 une pompe à vide plus efficace, ouvrant pour les chercheurs un nouveau champ d'investigations dans le domaine du vide profond. Ce fut l'outil incontournable des inventeurs de la lampe incandescence.

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.

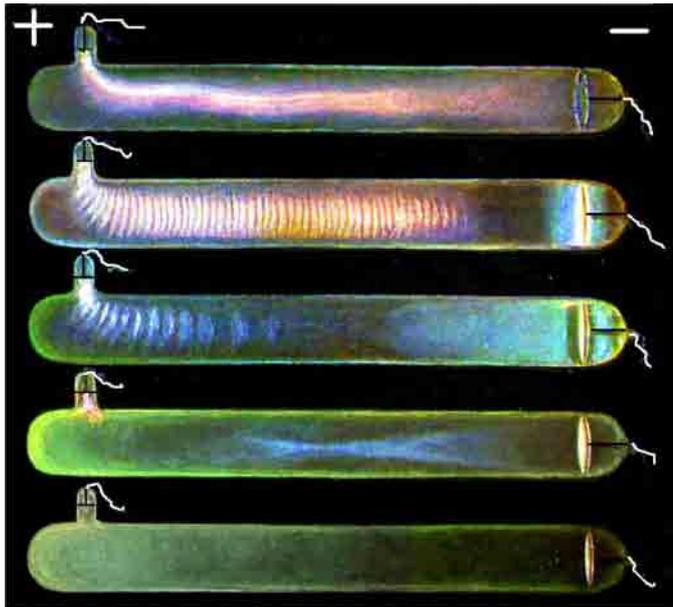
Sur la gravure (f), la pression d'air a été progressivement réduite du tube supérieur à celui du bas, dans lequel toute lumière interne a disparu dans un vide presque parfait.

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 *rayons cathodiques* traversaient l'espace presque vide, cette *matière radiante* qu'avait supposée Faraday.



e Rotation de la décharge



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.

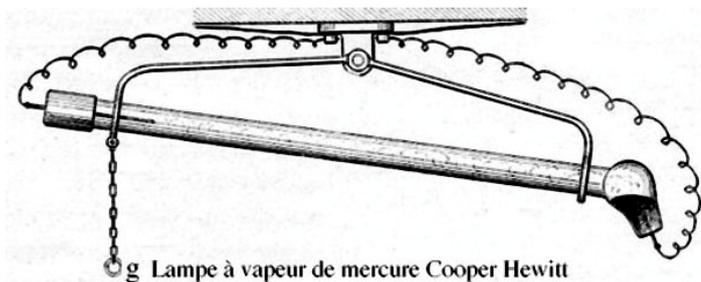
Apparition des lampes à décharge

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.

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.



Pages 51 à 54 non reproduites

Suite .../...

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.

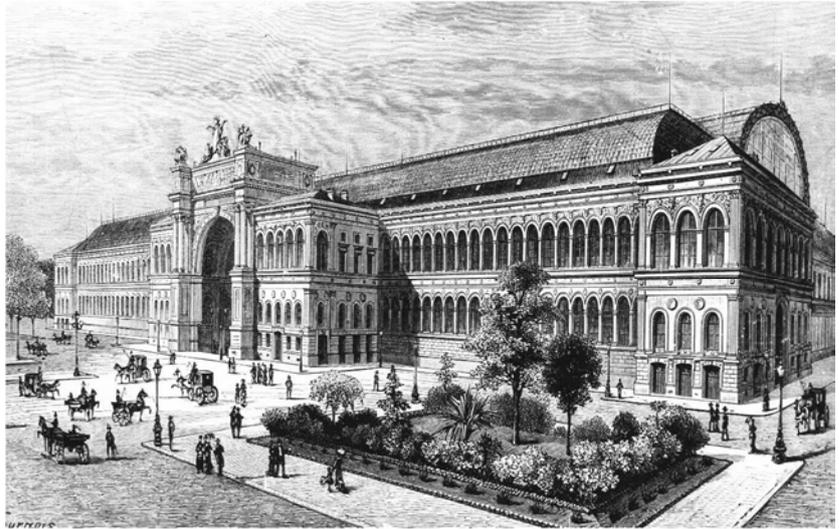
Tels étaient les objectifs proposés dans leur rapport d'octobre 1880 par les organisateurs de cette première exposition internationale, uniquement consacrée à l'électricité. Le comité d'organisation comprenant Gaston Berger, Antoine Breguet, et Hippolyte Fontaine était présidé par le ministre des Postes 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 féérique le soir, un phare projetait l'éclat de sa lanterne tournante, au centre d'un petit bassin.(b) Dans la moitié droite étaient rassemblés 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 côté 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.

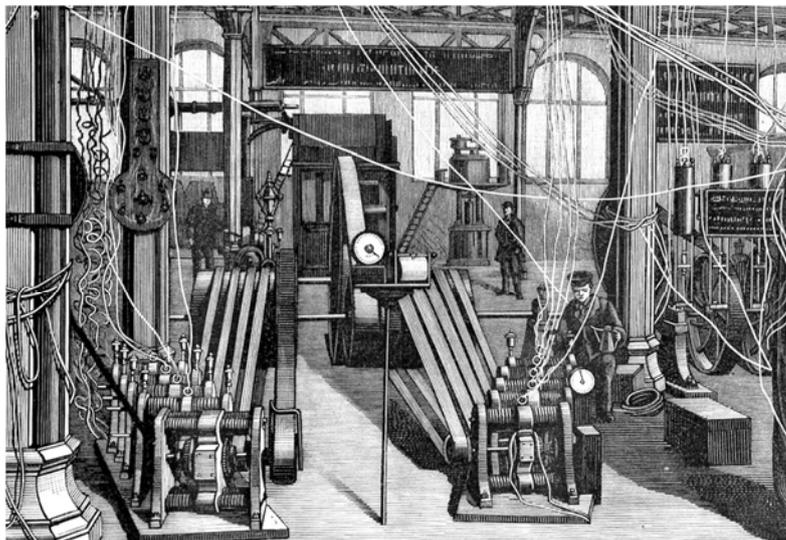
La puissance totale atteignait 1400 ch. Un équipement aussi puissant et varié, jamais réuni, permit simultanément des essais et comparaisons.

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)

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.



d Société des machines Gramme

Les salles de la galerie

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

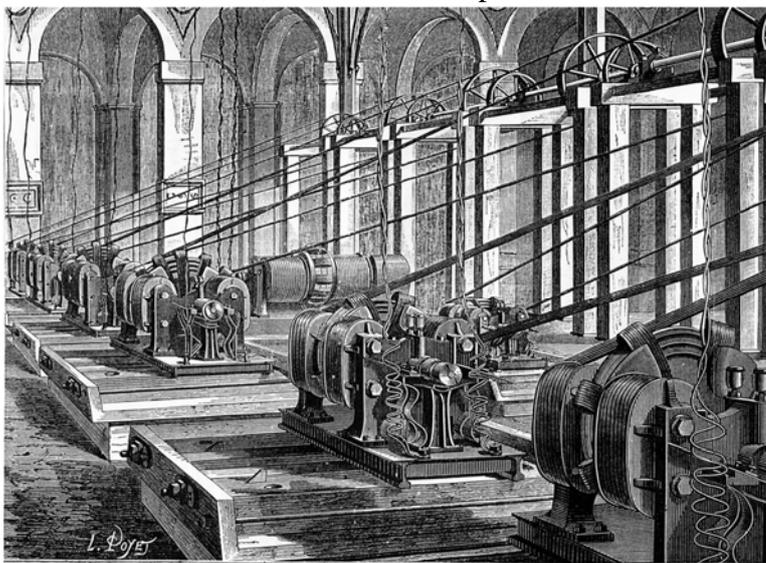
Chacune était éclairée par un système d'éclairage particulier, la majorité à arc. Certaines avec l'un des quatre nouveaux éclairages par lampe à incandescence, Swan, Edison, Maxim et Lane Fox. Une centaine de ces lampes éclairaient les couloirs et espaces communs.

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.

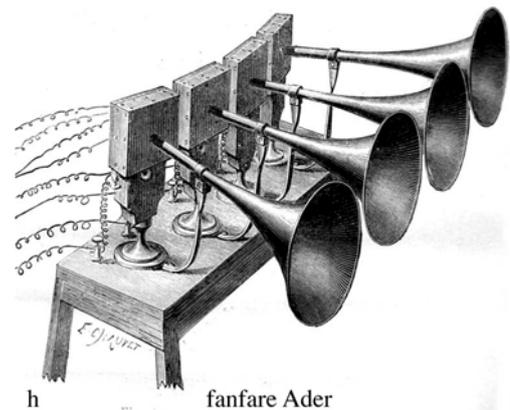
Au stand italien était présentée aussi la petite machine de Pacinotti, ignorée jusque-là, sinon des visiteurs de l'exposition de Vienne ou elle avait été présentée. Il en a été longuement question au sujet de l'invention des premiers générateurs Gramme (II-3). Quelques italiens considéraient que Gramme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



g Machines Brush

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).



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.

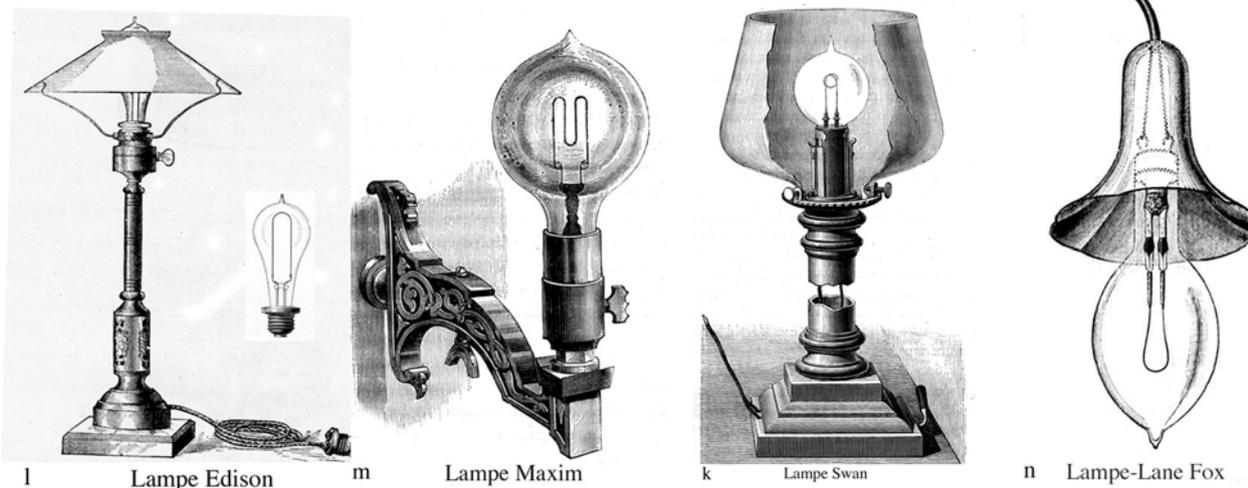
L'éclairage électrique

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.



Ces quatre lampes ne se différenciaient 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 :

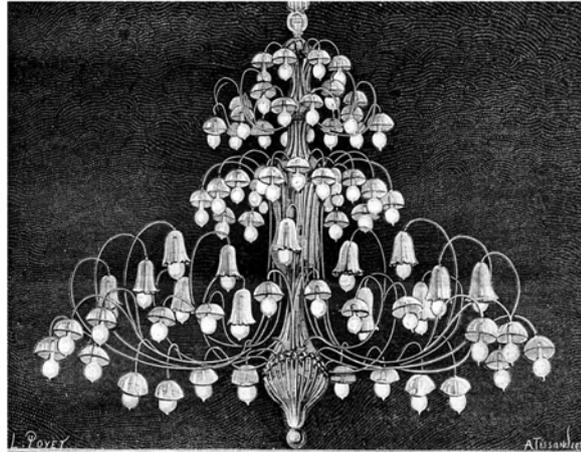
Lamp.	Nominal Candles.	Light Intensity, Standard Candles.	Resistance (Warm) Ohms.	Difference of Potential in Volts.	Current in Amperes.	Electric Energy in		Light Intensity per H. P.	No. of Lamps per H.P.
						Volt-Amperes.	H. P.		
RESULTS GIVEN BY THE EXHIBITION COMMISSION AT PARIS.									
Edison, 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.



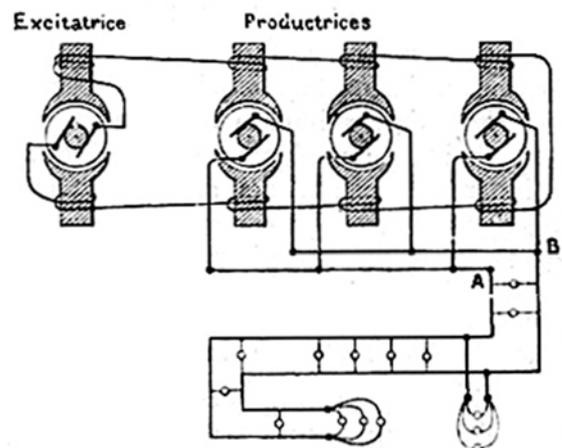
s Lustre Edison



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



w Montage des machines Maxim

régulateur. Celui présenté par Edison n'était pas encore automatique, seulement qu'un rhéostat manoeuvré manuellement.

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 machines 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.



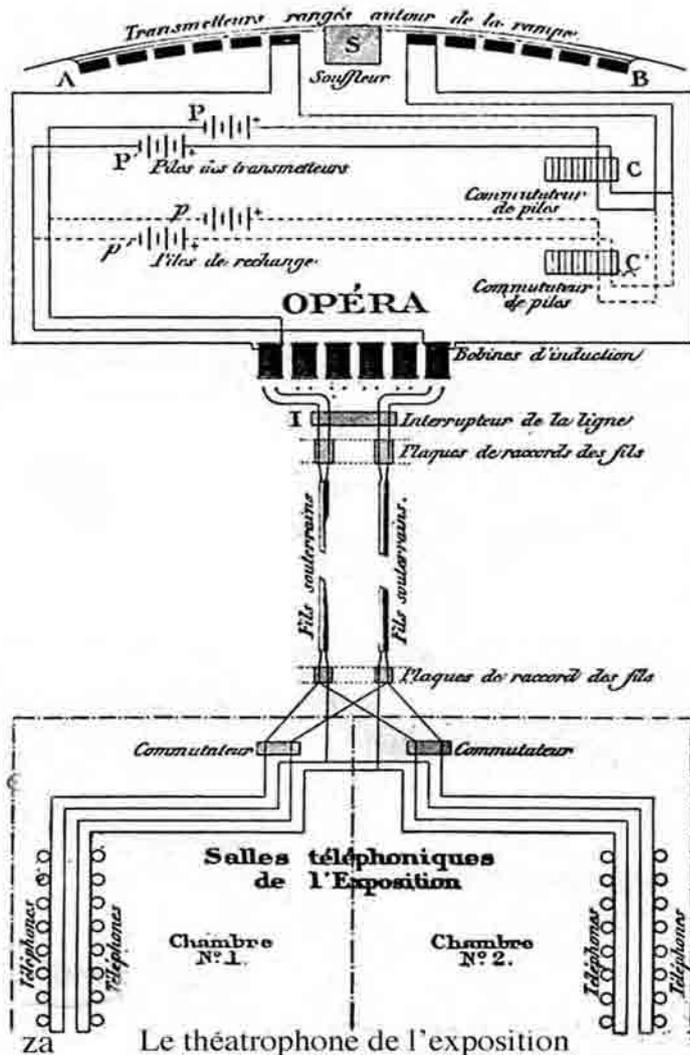
Foyer de l'Opéra de Paris

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

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 eut 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'allument 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 centaines de lampes sur des lustres, mais pour le seul public aisé de l'Opéra (x).



Le théatrophone, 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.

À l'Opéra, sur le devant de la scène étaient disposés de chaque côté du souffleur six transmetteurs, 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 disposés 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 théatrophones furent installés 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 Petersburg, reliés depuis le studio d'émission par des centaines de fils téléphoniques (zc).

Locomotion électrique

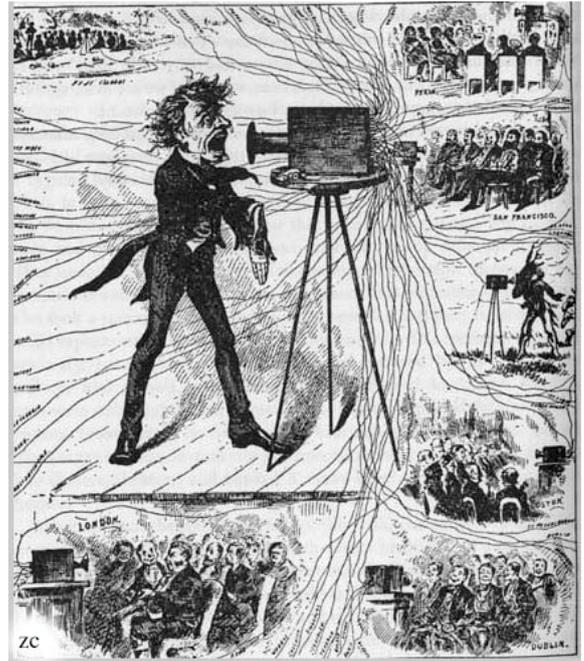
La force des moteurs électriques allait permettre de trouver un nouveau moyen de locomotion terrestre, complément du chemin de fer à vapeur. Dans plusieurs pays, apparaissaient de petites locomotives électriques. En France, Clément Félix, directeur de la sucrerie de Sermaize, présentait à l'exposition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



ze

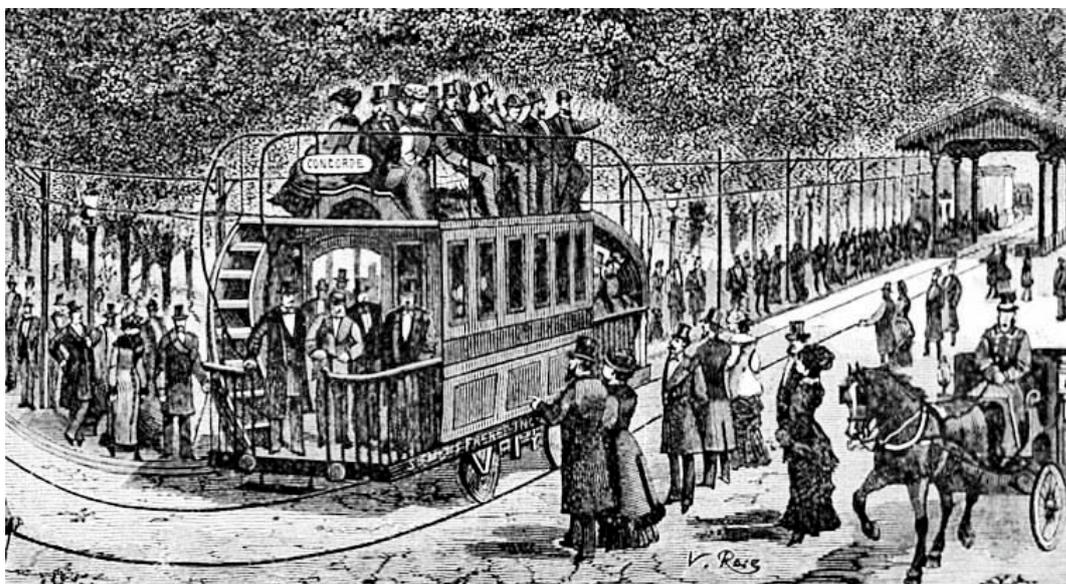
Exposition de Berlin- 1879

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.



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

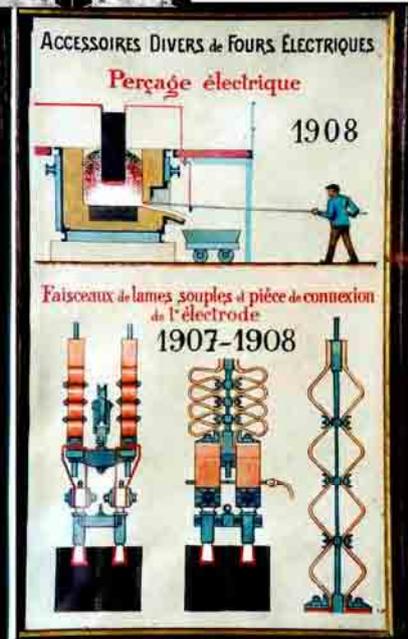
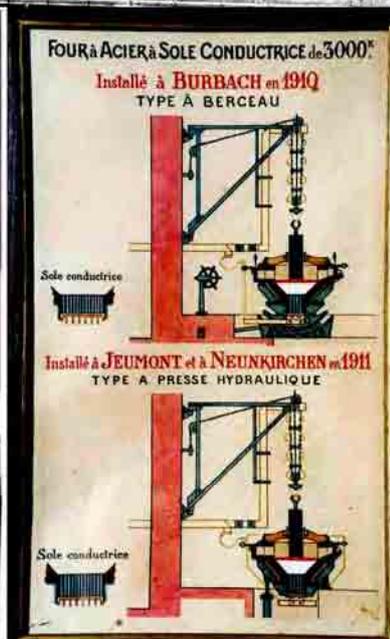
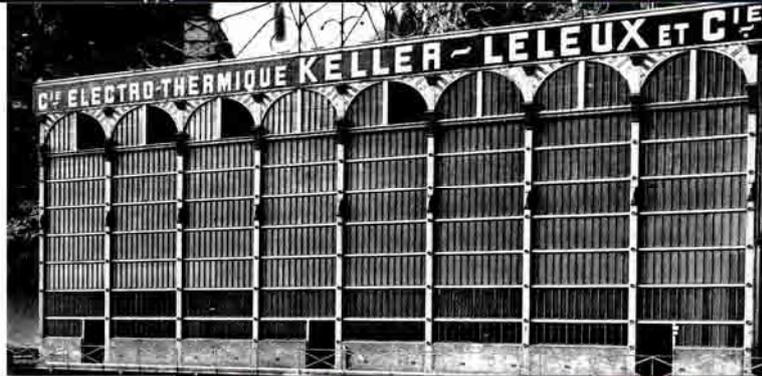
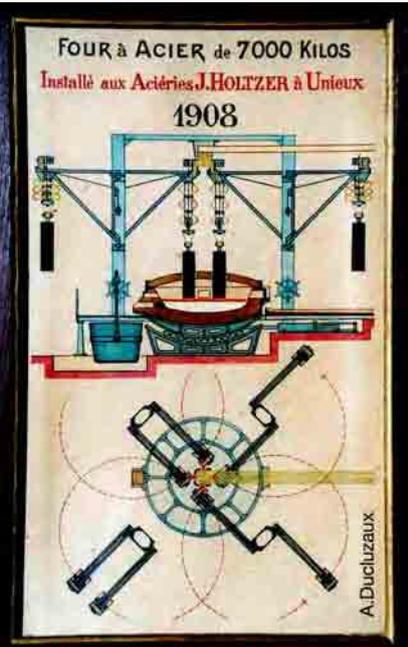
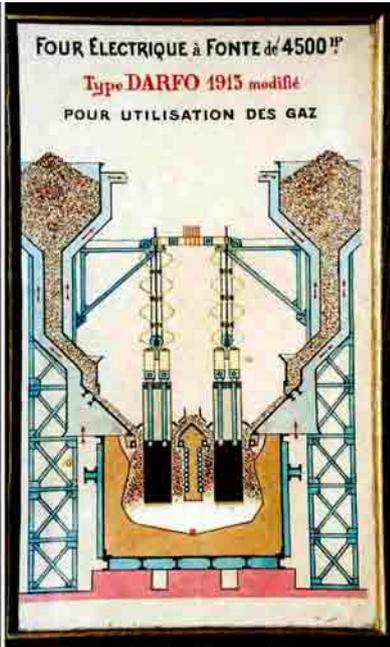


zg

Tramway électrique Siemens

Pages 63 à 93 non reproduites

Suite .../...



Fours Keller à Livet en Romanche

Pages 95 à 111 non reproduites

Suite .../...

Développements de l'électrolyse pour l'aluminium

Dès la fin du XIX^e, 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

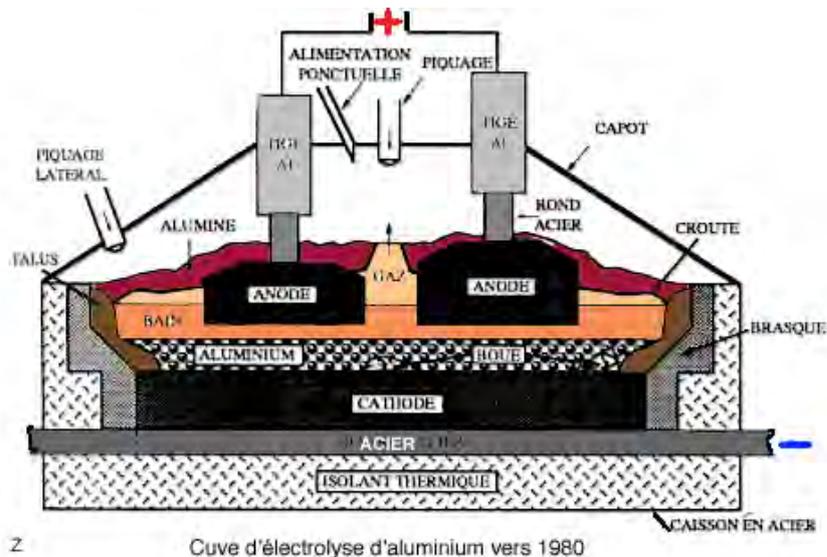
L'oxyde d'aluminium, alumine, est dissoute dans un bain fondant à 950° C, principalement composé de cryolyte. L'électrolyse *réduit* l'alumine : l'oxygène se dépose sur l'anode en carbone qui brûle en produisant du dioxyde de carbone, l'aluminium se dépose sur la cathode en carbone :



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 CO² 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 CO² 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)



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 entraînant 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, GEC, 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

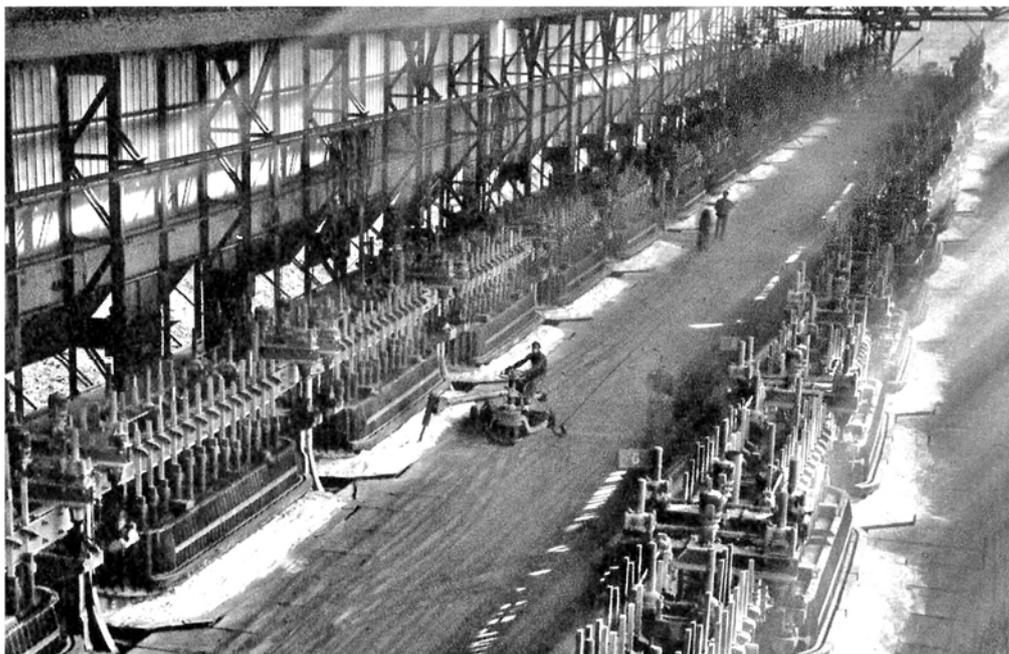
La British Thomson Houston BTH, proposait les premiers redresseurs au germanium en 1954. Alstom en construisit sous licence, une première commande d'un groupe 20 000 A sous 300 V pour Péchiney. Après quelques mois, les 3/4 avaient claqué. On sait leur faiblesse de tenue aux surtensions dépassant 800 V, comme aux surintensités. Pour les protéger contre les fortes surintensités de court-circuit, on imagina des *court-circuiteurs* ultrarapides, intervenant en 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

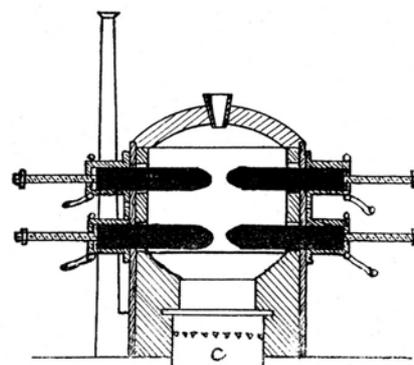
Le four à arc électrique

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.

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 :



zc Four Plichon - 1853

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).

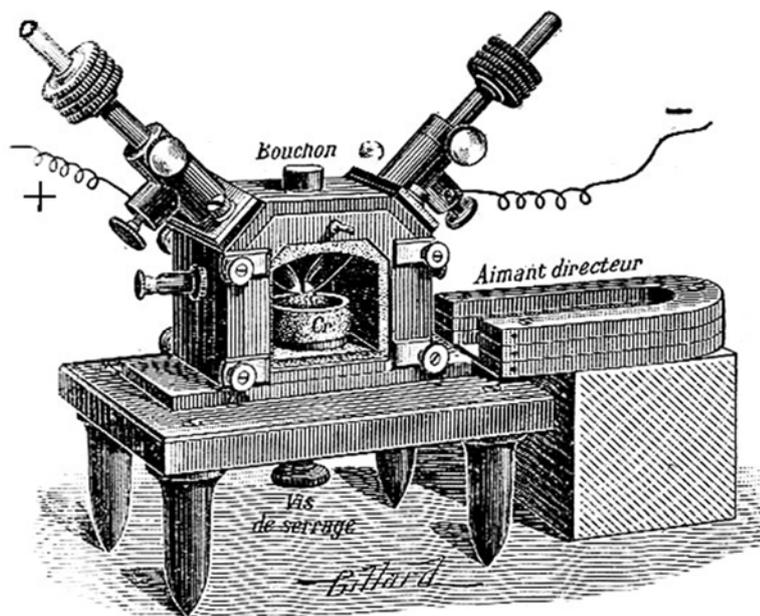
Avec ses premières dynamos, **William Siemens** démontrait en 1880, dans son usine de Woolwich que l'on pouvait fondre, en quatre minutes, 0,5 kg de pièces en acier dans un creuset (zd). Deux nouvelles dynamos Siemens montées *en quantité*, en parallèle, débitaient les ampères nécessaires sous 50 V.

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'Hérault. L'expérience fut renouvelée en 1881 devant des participants au Congrès international des électriciens.

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)

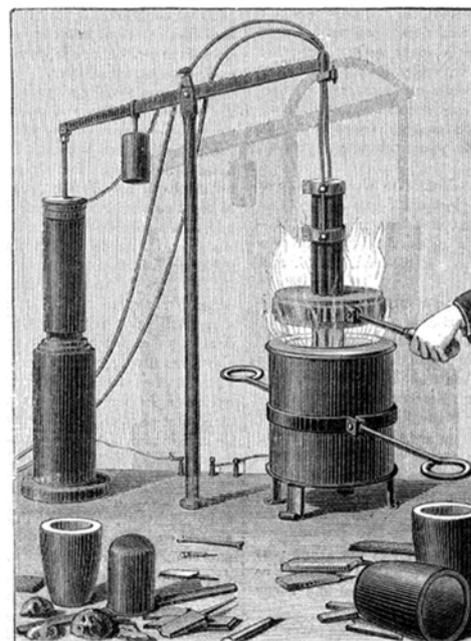


ze **Creuset électrique de M. Ducretet.**

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.



zd **Four électrique pour l'acier de William Siemens -1880**

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

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)

Développements sidérurgiques

De ces travaux préliminaires se dégagent 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.

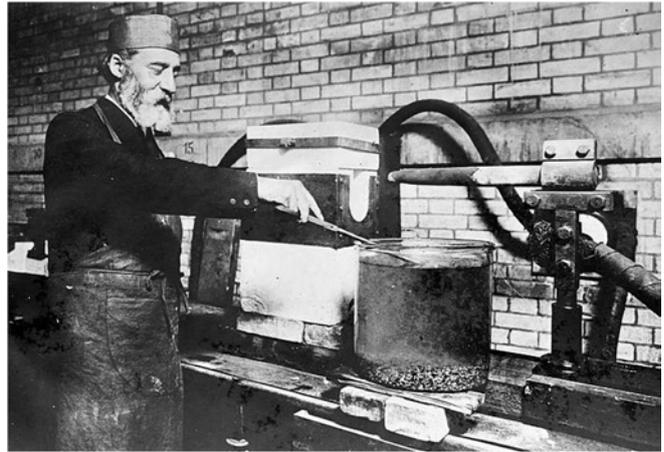
- Fondre des riblons et de la ferraille, puis épuration chimique du bain avec des laitiers synthétiques, mise à la dureté voulue de l'acier par diminution ou adjonction de carbone, alliage avec tous autres métaux.

- 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.

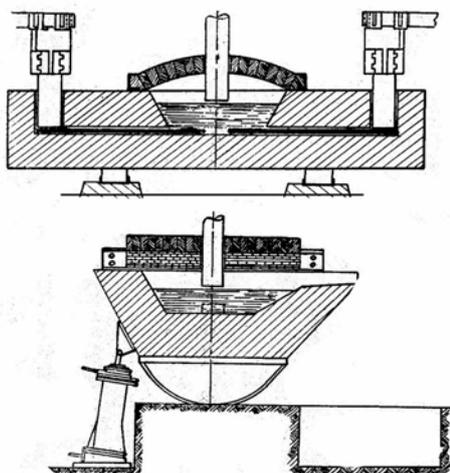
Les deux derniers process de métallurgie ou mieux de sidérurgie sont parfois désignés sous le terme d'*aciérie électrique* pour les différencier de la *filère fonte* classique. Ces différentes applications vont mobiliser les développeurs dans tous les pays à partir de 1898. Chacun va concevoir des modèles 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 remarquables. Ils les concevaient d'abord pour leur propre usage, certains devenaient aussi fabricants de fours, ou ils concédaient seulement la licence de leur invention.



zf Moissan devant son four - 1884



zg Fours Chaplet

- Chaplet

Il avait commencé à produire des ferro-alliages en 1893, mais ils se carburèrent parfois trop sous l'action du carbone 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 carbone à mélanger à l'oxyde pour sa réduction était ainsi facile à doser.

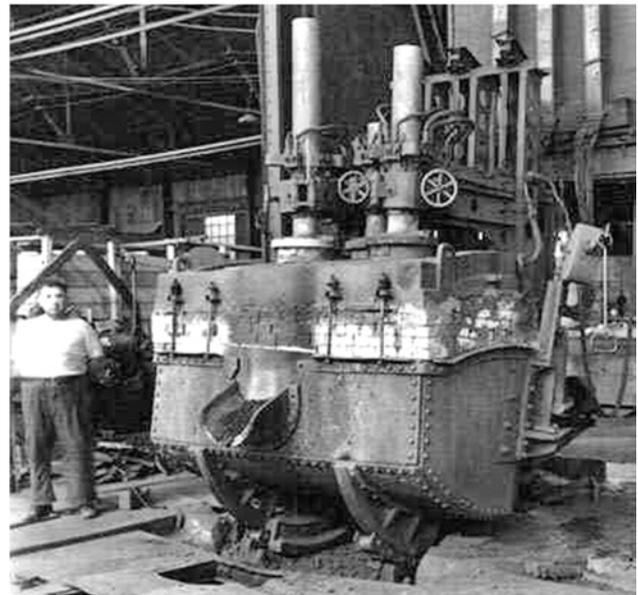
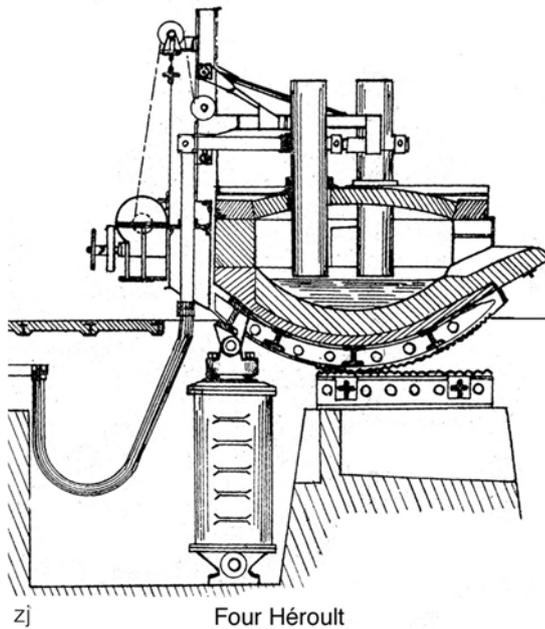
Avec les ingénieurs de la société « *Le Nickel* », il obtint des alliages au nickel et au molybdène.

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.

– Hérault

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.



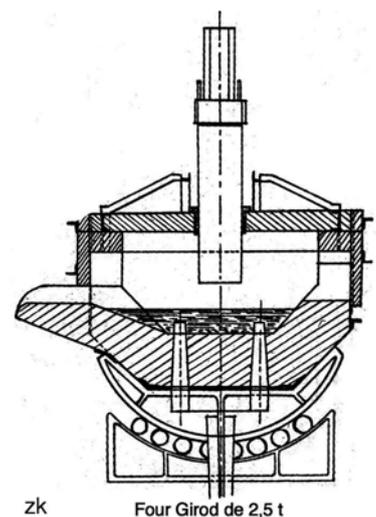
Le four devient basculant en 1901 pour faciliter l'évacuation (zh), (zj). Il met aussi au point un premier système automatique de régulation électrique des électrodes.

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

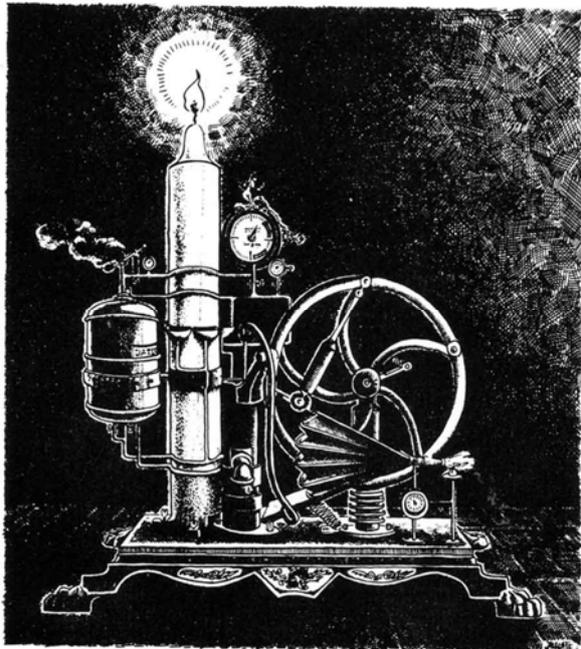
Mais Héroult n'aspire pas à créer une aciérie électrique, il conçoit et vend des fours toujours plus perfectionnés. Il devient un conseiller métallurgiste apprécié, en particulier aux Etats-Unis.

– 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 Venthou, 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 Venthou, il crée à Ugine une aciérie électrique d'aciers fins et spéciaux, la plus importante de France (zk).



**ce n'est pas en perfectionnant
la bougie**



que l'on a inventé l'électricité

Fin du tome III

Pages 118 à 130 non reproduites