

ANDRÉ DUCLUZAUX

# L'ÉLECTRICITÉ

# DÉCOUVREURS ET INVENTEURS

*Tome IV - Vecteur d'énergie*



**André Ducluzaux**

# **L'électricité**

## **Découvreurs et Inventeurs**

Cent aventures de  
physiciens, autodidactes,  
ingénieurs, techniciens

**Tome IV**

## **Vecteur d'énergie**

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

# Sommaire

## **Tome I – Défricheurs de l'inconnu**

## **Tome II – Générer l'électricité**

## **Tome III – Et la lumière fut – L'électrochimie**

## **Tome IV – Vecteur d'énergie**

<b>1- Le moteur électrique</b> .....	11
L'électro-aimant. Pistes de recherches. Tentatives avec l'électro-aimant. Echecs. Moteurs en anneau. Moteurs/ générateurs. Petits moteurs.	
<b>2 – Transport de la Force par l'électricité</b> .....	23
Expériences Deprez continu à haute tension : Munich, Gare du Nord, Grenoble, Creil. Expérience en série de Fontaine. Gaulard redécouvre l'alternatif avec le transformateur à Londres et Turin. En Italie, Ferraris. En Autriche-Hongrie, Ganz. En Grande Bretagne, tramway de Portrush, centrale Depford. Aux Etats-Unis, guerre des courants Westinghouse/Edison. Moteur à induction, Ferraris, Tesla. Allemagne, triphasé d'Haselwander, moteur de Dobrowolsky. Défi de Francfort. En résumé. Transport sans fil Tesla. Épilogue.	
<b>3 – L'alternatif, nouveau vecteur d'énergie</b> .....	85
Domaines réservés au continu. Comprendre et calculer en alternatif. Alternateur. Transformateur. Moteur synchrone. Moteur asynchrone polyphasé. Alternomoteurs monophasés. Générateur asynchrone. Autres moteurs en alternatif. Transformer l'alternatif en continu. Les très hautes fréquences.	
<b>4 – Centrales et transport</b> .....	121
Puissante centrale du Niagara. Centrales et réseaux en alternatif polyphasé. Transport en continu haute tension : système Thury, redresseurs à mercure, à thyristors. Applications CCHT.	
<b>5 - Locomotion électrique</b> .....	141
A l'origine, la vapeur. Tramway électrique : moteur, alimentation, trolleybus. Chemin de fer électrique, alimentation, Grande vitesse. Électromobile. Auto pétroléo-électrique. Renaissance au xxe siècle. Navigation électrique. Locomotion aérienne.	

## **Tome V – Vecteur d'information**

Le sommaire général des 5 tomes figure en fin de livre



Albert Robida -1885

esclave ou fée ?

## 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.

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

Cette ambition m'a conduit à ne pas rééditer une histoire limitée à un catalogue chronologique de faits, dates, événements, personnages et machines. Elle 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, puis après leurs conséquences, pour mieux en percevoir l'originalité et le mystère - des exemples pour le chercheur d'aujourd'hui.

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

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

Avant de relater chaque découverte ou invention, il faut rechercher ses raisons et les difficultés latentes, humer *l'air du temps* ; essayer de dégager ensuite *le fil rouge*, la démarche incertaine ou rapide qu'avaient suivi leurs auteurs. Une telle analyse permet au lecteur d'intégrer à sa place chacune de ces briques éparses, dans la construction progressive, mais désordonnée et sans logique apparente, du système électrique global. La forêt est autre chose qu'une somme d'arbres.

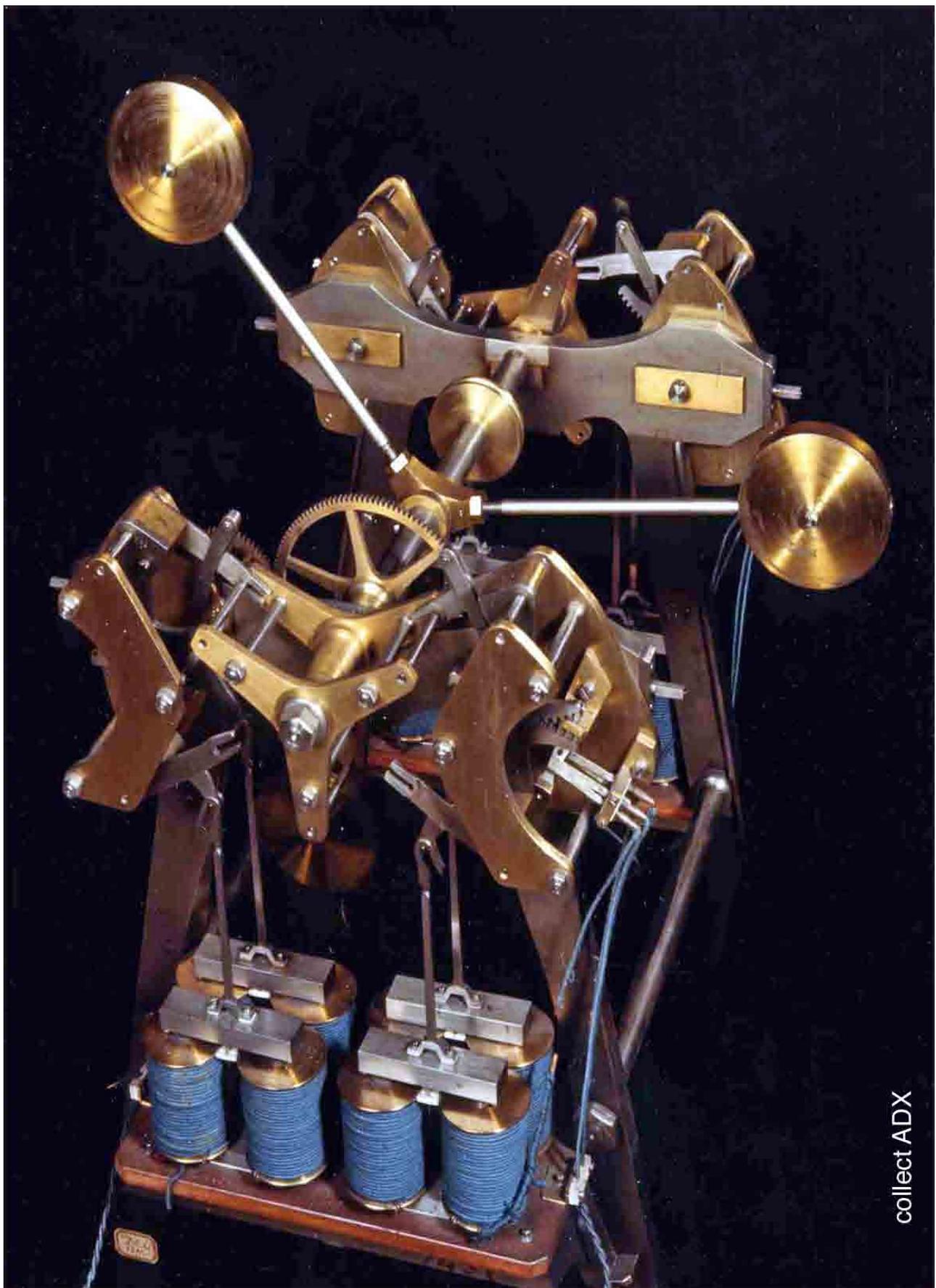
Comprendre une invention nécessite de l'analyser bien au-delà de l'angle scientifique ou technique. Tout y intervient, la formation et l'expérience des hommes, leur mentalité, méthodologie, motivations et environnement ; Sans oublier les aspects commerciaux, financiers et même nationaux, transformant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

La finalité de l'histoire des sciences et techniques est d'essayer de comprendre ce 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 2011

Suite de l'avant-propos, voir tome I



collect ADX

Moteur Pierret , à électro-aimants - 1864

# 1 - Le moteur électrique

Convertisseur d'énergie électrique en énergie mécanique, le moteur électrique, est pour nous comme l'application électrique presque la plus importante. Ce ne fut cependant pas le cas, avant 1875,

Depuis des millénaires, l'énergie mécanique dont disposait l'homme était sa propre force musculaire et celle des animaux qu'il avait domestiqué. Ensuite il asservit avec les moulins les forces naturelles du vent et celle de l'eau retournant à la mer. La nouvelle civilisation industrielle qui transforma le monde au XIX<sup>e</sup>, était fondée sur un accroissement colossal de la disponibilité d'énergie mécanique avec le moteur à vapeur, transformant l'énergie chimique de combustion du charbon. S'y ajoutait après 1830 l'accroissement de l'énergie hydraulique disponible avec la turbine, remplaçant les anciennes roues ; plus tard vint le pétrole exploité par les moteurs à explosion.

Aussi, obtenir un peu d'énergie mécanique à partir de l'électricité, dont on soupçonnait à peine le potentiel énergétique, paraissait dérisoire. Les quelques ampères et volts que fournissaient les piles étaient très loin de concurrencer les tonnes de charbon. Le problème du moment était la production d'électricité mieux et plus que par les piles, il a été longuement détaillé (II-1).

Pourtant, des physiciens et bricoleurs ingénieux se sont lancés dans cette aventure du moteur électrique, plus animés par la satisfaction intellectuelle que par l'espoir d'un résultat exploitable. Ils se contentaient d'inventer une petite maquette originale, capable de faire un petit travail à partir du faible courant des piles.

Ils ne pouvaient pas encore envisager d'en faire une machine industrielle assez puissante, capable de fonctionner avec un bon rendement, pendant des milliers d'heures, à un coût acceptable. Ce qu'est le moteur électrique pour nous.

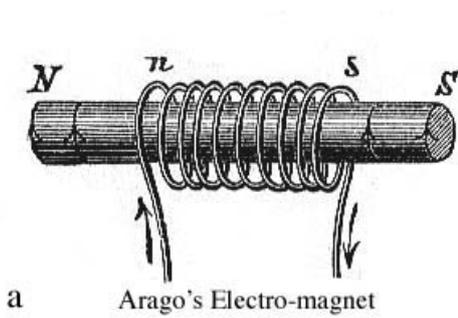
Dans son livre de 1884, *l'Électricité comme Force motrice*; Théodore du Moncel décrit 43 moteurs, un peu moins que les inventeurs de piles. Certains revendiquaient leur priorité et brevetaient leur gadget, que personne ne songeait à utiliser sinon comme jouet scientifique.

Il faut néanmoins préciser que personne n'envisageait d'autre électricité motrice que celle en courant continu, sauf marginalement pour l'éclairage à arc, un courant très particulier *alternativement renversé*. Lorsqu'on découvrit pendant la décennie 1880 que ce courant alternatif allait s'imposer pour le transport de la *force* au loin, le moteur courant continu s'avéra incapable de fonctionner avec ce nouveau courant. L'invention laborieuse d'un moteur complètement différent pour l'alternatif devint incontournable (IV-2 et 3).

## L'électro-aimant

Le premier, le plus simple, le moteur le plus universel existait déjà.

Ce n'est pas vraiment un moteur capable de produire un travail continu, plutôt un *actionneur* effectuant seulement deux brèves manœuvres, marche - arrêt. Il résultait de l'idée d'Arago, cherchant en 1820 à vérifier si le solénoïde d'Ampère remplaçait bien l'aimant naturel ; il en approche une tige de fer que le bobinage attire, mais mieux, il aspire la tige en son centre.



L'ensemble de la tige de fer entourée d'une bobine devient un aimant beaucoup plus fort que la bobine seule ou un aimant naturel (a). Surtout il fonctionnait sur commande, par la connexion ou déconnexion de ses fils de liaison avec la pile, premier composant des automatismes électriques.

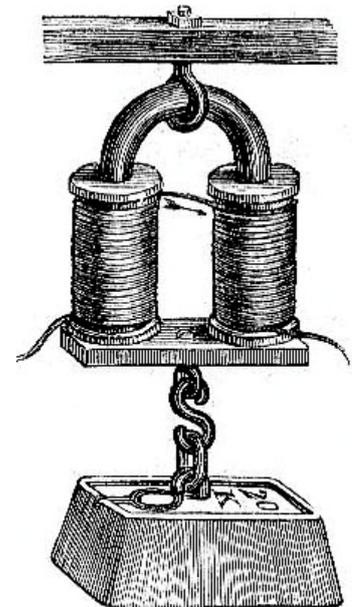
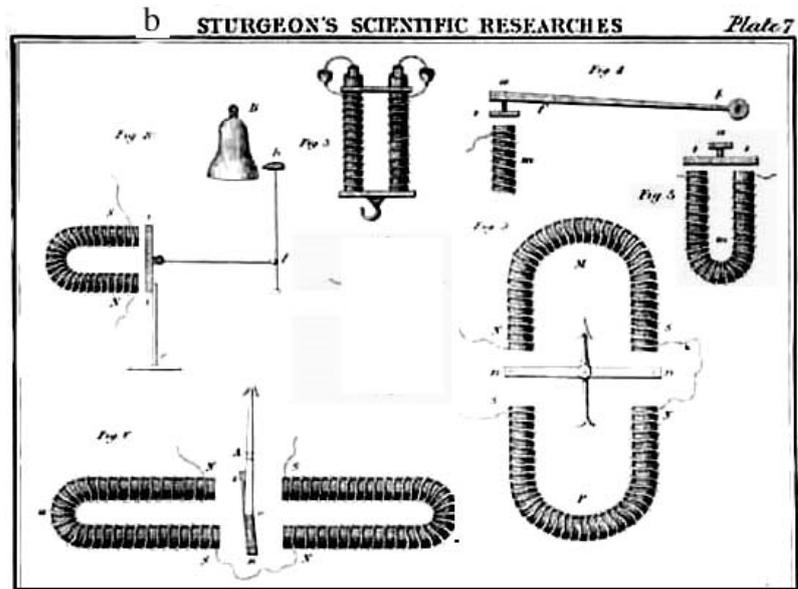
William Sturgeon, électricien de Manchester, lui donne en 1825 une forme plus pratique, celle d'un fer à cheval, permettant d'attirer une plaque de fer se « collant » sur les deux pôles (b). Il réalisa ainsi un électro capable de porter 20 fois son propre poids, soit 9 pounds, cela lui valut la médaille d'argent de la *Royal Society of Arts* (c). Le record fut battu en 1830 par l'Américain Joseph Henry qui soulevait un poids de 750 pounds.

Cet exploit n'était encore qu'anecdotique à côté d'une application pleine d'avenir, qu'esquissa Henry l'année suivante : deux fils furent installés entre son laboratoire de Princeton et sa maison, 150 m plus loin sur le campus ; avec un interrupteur, il connectait les deux fils dans le circuit d'une pile et à l'autre extrémité, dans la maison, un électroaimant émettait un claquement, lui permettant de communiquer avec sa femme par un code rudimentaire. L'électroaimant se révélait ainsi comme l'actionneur commandé à distance du futur télégraphe.

Première application énergétique de l'électricité, c'est encore aujourd'hui l'une des plus répandue : des milliards de ces *électros* actionnent les démarreurs des véhicules, verrouillent nos portes, commandent les circuits électriques. Notre indifférence à tous ces discrets et dociles esclaves, ou notre contrariété lorsqu'ils défont, contrastent avec l'enthousiasme d'un discours de l'académicien Cornu en 1881:

*« Nulle invention, depuis celle de l'imprimerie, n'eut plus d'influence dans le monde que celle de l'électro-aimant ; c'est lui l'organe essentiel de toutes les applications électriques, c'est par lui que tous les progrès ont été accomplis. »*

*« Si l'électricité est la messagère rapide et fidèle de la Société moderne, si cet agent mystérieux rend les services les plus extraordinaires par le télégraphe, le téléphone, par ces machines puissantes qui semblent avoir enchaîné la foudre ; si d'un bout du monde à l'autre nous pouvons transmettre la pensée, ainsi que la lumière et la force, c'est à l'électro-aimant, c'est, en définitive, au solénoïde d'Ampère que nous le devons, il est là, partout où s'accomplit l'un de ces prodiges... »*



## Pistes de recherche

L'invention du moteur électrique à courant continu s'avérait plus complexe que celle du générateur électromécanique, il fallait créer des forces d'Ampère à partir des attractions et répulsions entre conducteurs ou électroaimants.

Sur le plan **électromagnétique**, on pouvait obtenir ces forces soit:

–Entre une bobine à noyau de fer et une pièce mobile en fer, comme pour l'électroaimant –ou entre deux bobines.

–En appliquant un champ magnétique sur un conducteur suivant les règles d'Ampère, comme la roue de Barlow.

Au point de vue **mécanique**, le mouvement obtenu était soit:

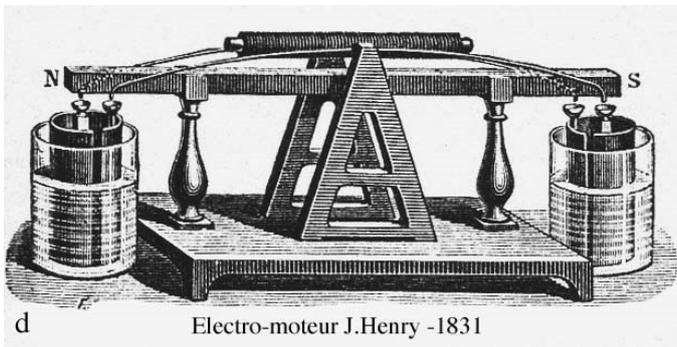
–Une rotation directe, plus simple

– Ou indirecte, obtenue par oscillations linéaires alternatives, transformées en mouvement rotatif par le système bielle-manivelle classique des moteurs à vapeur.

## Tentatives avec l'électro-aimant

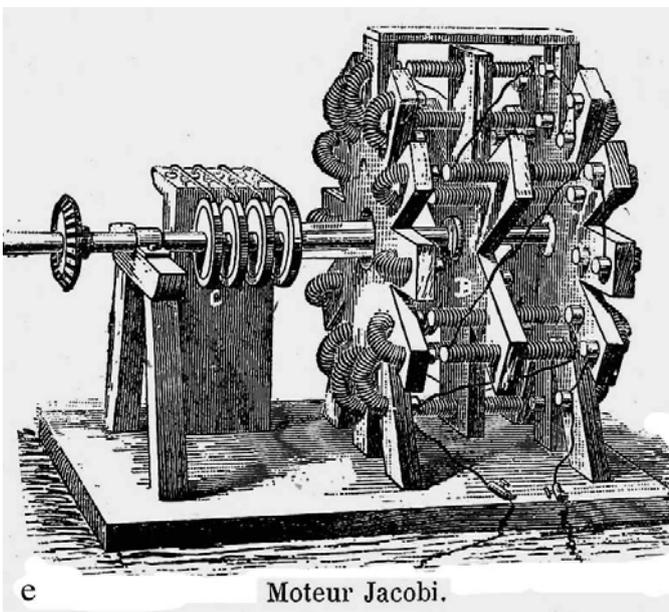
La roue de Barlow, premier moteur élémentaire n'a guère inspiré les inventeurs, elle ne fonctionnait qu'à une très faible tension ; pourtant des moteurs industriels spéciaux, homopolaires, ont été développés sur ce principe à la fin du siècle.

Par contre l'électroaimant en a séduit beaucoup, un appareil aussi simple et efficace pour faire une action ponctuelle devait pouvoir la répéter d'une façon continue. Là était toute la difficulté.



Jacobi et Lenz avaient établi les lois de l'électroaimant : La force est proportionnelle à l'intensité du courant et au nombre de tours de la bobine, mais indépendante de sa section.

Quel était le premier moteur à électro-aimant ? Question qui intéresse la petite histoire des inventeurs. D'après certains ce serait un professeur de Padoue, l'abbé Salvatore Dal Negro, avec un dispositif compliqué (1831 ou 32). Pour d'autres, ce serait une sorte de bascule inventée en 1831 par J. Henry (d), un électroaimant oscillant solidaire de deux tiges de contact est placé au-dessus d'un aimant NS. Lorsque les tiges se connectent au contact d'une pile par deux cupules de mercure, l'électro bascule et le contact s'établit avec l'autre pile. Peu importe qui a réalisé un premier moteur, l'important c'est qu'il ait existé.



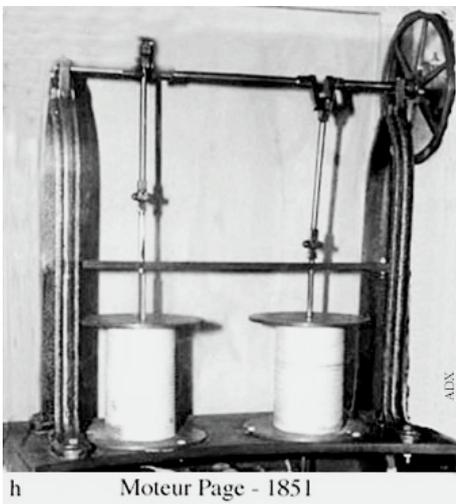
Le premier moteur ayant développé une énergie mécanique appréciable a été celui d'**Hermann von Jacobi** (1), d'origine prussienne, installé à St Petersburg. Après un premier mémoire à l'Académie des sciences de Paris en 1834, il obtint 60 000 F du tsar Nicolas, promoteur des sciences et techniques, pour construire et essayer son moteur (e).

Le principe en reposait sur les attractions et répulsions successives d'une douzaine d'électroaimants, les uns fixes étaient montés sur deux flasques en bois, de chaque côté d'une planche mobile fixée à l'arbre, recevant les électros tournants. Le courant des électros mobiles était inversé chaque fois qu'ils passaient devant un électro fixe, par un commutateur fixé sur l'arbre à gauche.

Le moteur fut monté en 1838 sur un bateau de 8 m avec des roues à aubes pour le propulser sur la Néva, avec 12 personnes à bord. La vitesse atteinte fut de 4,1 km/h avec 128 piles Grove, les meilleures à cette époque, la puissance utile estimée à 3/4 de cheval. Sur les berges, une foule regardait l'expérience, les piles fumaient et dégageaient des vapeurs jaunes d'acide. Elles incommodèrent les expérimentateurs et il fallut arrêter l'expérience –Il essaya de revenir aux piles Daniell en les améliorant, n'y parvint pas, mais ces travaux lui firent découvrir la galvanoplastie (III-6). Jacobi fit plusieurs publications, dont une loi, la première recherche théorique sur le fonctionnement d'un moteur : *Le travail mécanique fourni par un moteur est maximum quand il tourne à une vitesse telle que le courant qui y circule est la moitié de celui mesuré lorsque le moteur est arrêté* ». C'était méritoire à une époque où l'on découvrait juste la loi de circulation des courants (Pouillet – Ohm)).

Le physicien exprimait indirectement ce que l'on a appelé plus tard la *force contre-électromotrice* d'un moteur, qu'il assimilait à une résistance interne variable. À pleine vitesse, l'intensité se trouvait réduite de 50%. Aussi pendant des années, on a considéré qu'un moteur ne pourrait jamais fournir plus de 50 % de l'énergie électrique qu'il recevait des piles. Siemens rectifia l'erreur. Cependant, avec les données que l'on a sur l'expérience de Jacobi, le rendement devait être de l'ordre de 20 à 25 %, bon résultat pour une machine de cette conception. À noter que ce moteur était par principe réversible, propriété sans intérêt à cette époque.

Les inventeurs imaginèrent d'autres moteurs.



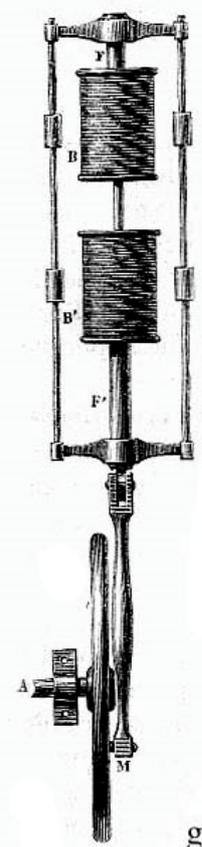
h Moteur Page - 1851

Quelques-uns songeaient déjà à propulser un véhicule, **Davidson** fit circuler entre Édimbourg et Glasgow une petite locomobile faisant 4 milles à l'heure (1842).

Aux États-Unis, **Page** présente en 1850 au Smithsonian Institut, un moteur à deux électroaimants très puissant de 4 à 5 ch, capable même de scier des planches d'après le journal local (g); d'après le brevet déposé en France, la puissance était plutôt d'un demi-cheval. Un autre modèle plus modeste est en fonctionnement au musée Ampère de Poleymieux (h).



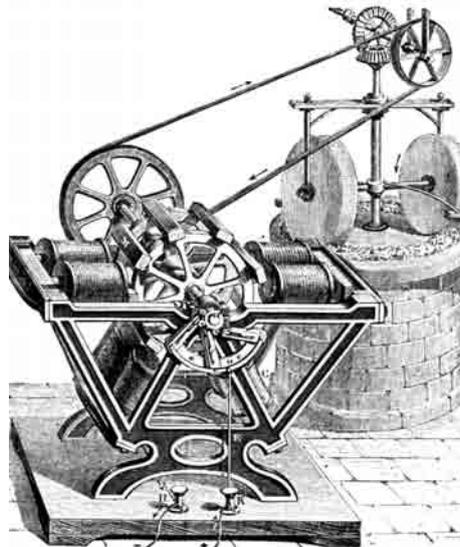
f Expériences de M. de Jacobi sur la Néva (1839)



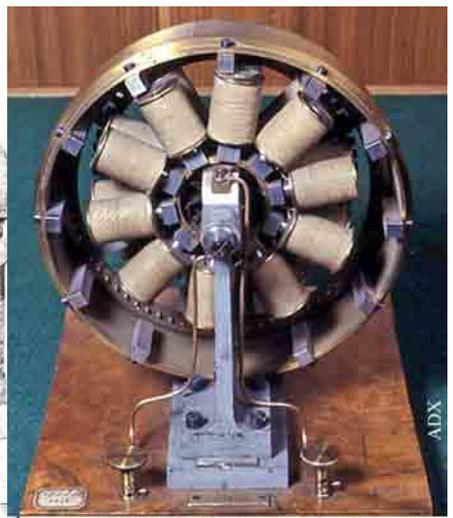
g Moteur Page



j Moteur Froment - 1844



k Moteur Froment - 1845



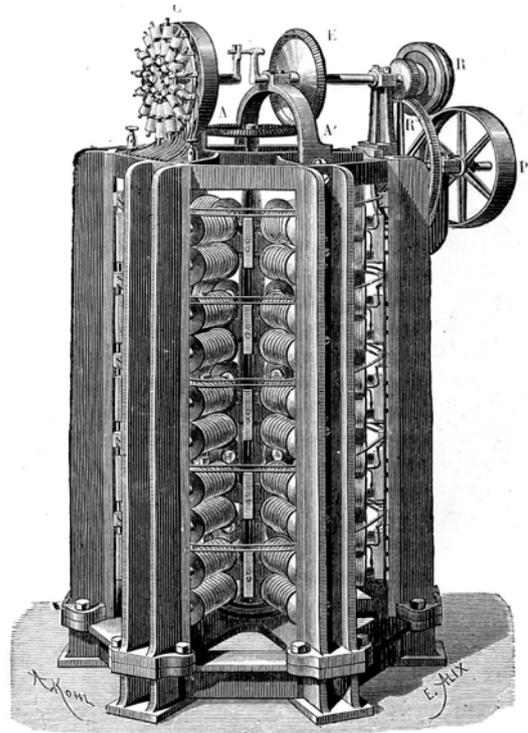
Moteur épicycloïdal Froment - 1847

**Gustave Froment**, ingénieur de Polytechnique, consacra des années et beaucoup d'argent à concevoir une dizaine de moteurs, sans grand succès. Le premier de 1844 (j) est classique, celui de 1845 (k), à rotation directe est inspiré de la roue à aubes des moulins hydrauliques. Un commutateur à came établit le contact avec la pile, successivement sur les quatre paires d'électros, lesquels attirent les barrettes de fer de la partie tournante. Froment essaya avec un autre principe épicycloïdal (l) de régulariser l'approche des électros tournants en décentrant la roue.

Assez désespéré de ne pas réussir à trouver une solution mécanique exploitant mieux la force des électroaimants, il les multiplia dans un grand moteur (m), qui ne devait guère dépasser un demi cheval vapeur.

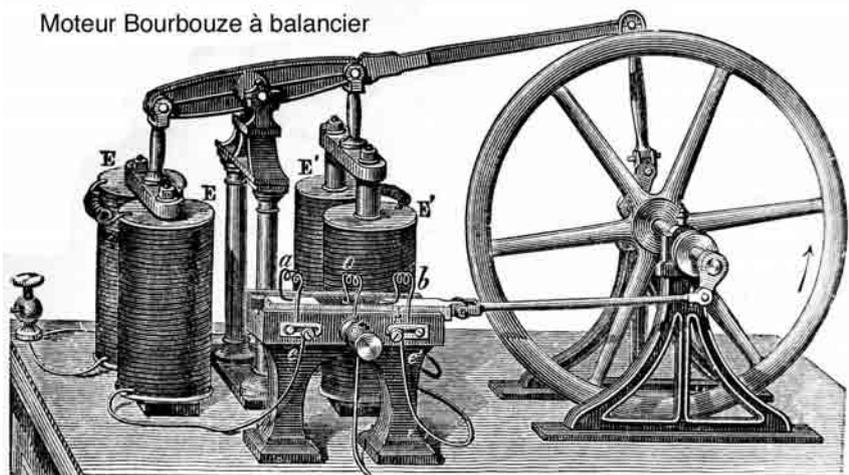
Il avait cherché sans succès à se dégager de l'obsession de beaucoup d'inventeurs qui transposaient inconsciemment au moteur électrique la technologie de construction du moteur à vapeur : l'électroaimant et son armature mobile figurant le cylindre et le piston celui de la machine à vapeur.

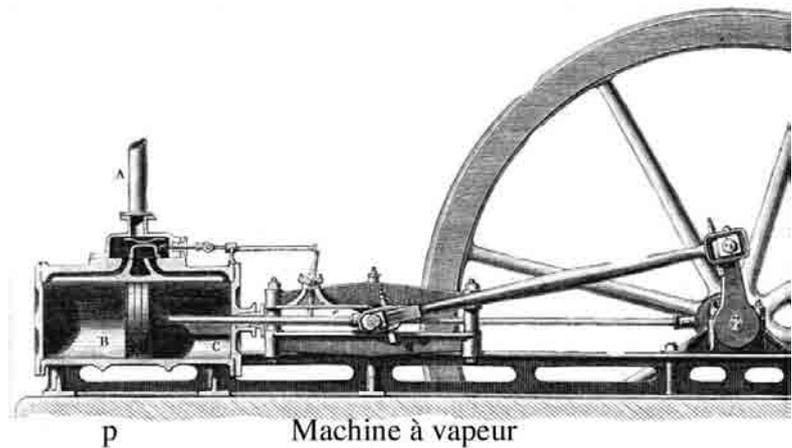
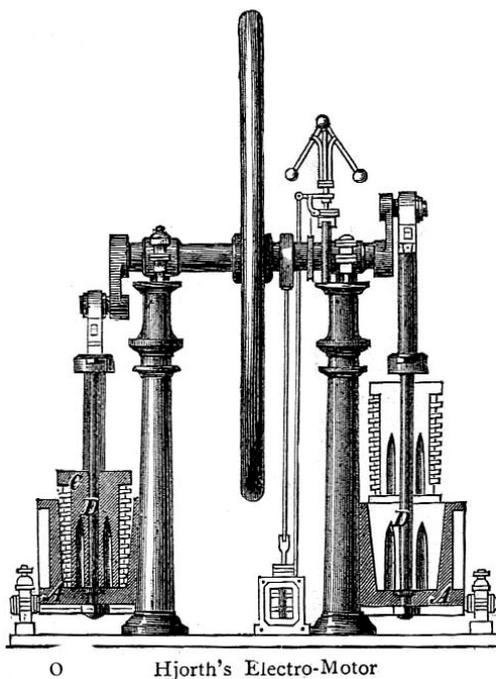
Similitude étonnante sur le moteur de Bourbouze (n)



m grand moteur Froment

Moteur Bourbouze à balancier





Similitude que l'on retrouve encore plus accentuée sur le moteur du physicien danois Soren Hjorth (o), mécaniquement proche d'un moteur à vapeur traditionnel (p). Le problème étant que la force du champ magnétique d'un électro n'a rien à voir avec celle de la vapeur.

Sur la vue de profil de la **machine de Hjorth**, les deux électros latéraux décalés simulaient les cylindres-pistons de vapeur, entraînant la roue par le système bielle-manivelle ; au-dessus, le classique régulateur à boules centrifuges règle la vitesse d'un petit commutateur d'alimentation des électros situés sous la roue, lequel a une fonction identique au tiroir réglant l'admission de la vapeur suivant la position du piston.

### Échec du moteur à électro-aimants

Tous ces systèmes compliqués, inspirés par le moteur à vapeur, traduisent l'air du temps. Le capitaine Nemo de Jules Verne (1870) expliquait au professeur Aronnax la propulsion du sous-marin Nautilus :

« ... *L'électricité produite* (par des piles au sodium, énergie facilement renouvelable en mer !) *se rend à l'arrière où elle agit par des électroaimants de grandes dimensions sur un système particulier de levier et d'engrenages qui transmettent le mouvement à l'hélice. Celle-ci, dont le diamètre est de six mètres peut donner jusqu'à cent vingt tours par secondes.*

- Aronnax : *et vous obtenez alors ?*

- Nemo : *Une vitesse de cinquante miles à l'heure... »*

Mieux qu'un moderne sous-marin atomique, aussi à propulsion électrique !

Les auteurs de science-fiction, de Verne à Hergé, n'imaginaient rien tout seuls, ils allaient consulter les savants de l'époque et extrapolaient fortement.

Après toutes ces tentatives, l'échec des moteurs à électroaimant était avéré.

Quels obstacles ces expérimentateurs n'ont-ils pas réussi à surmonter ?

– Le premier, d'ordre mécanique, dont certains avaient bien pris conscience, résidait dans la distance très faible des pôles à laquelle la force magnétique d'attraction s'exerce efficacement sur une armature. Approximativement proportionnelle au carré de la distance, mais variable suivant la géométrie des pièces polaires, cette force est telle que près des trois quarts de l'énergie d'attraction est fournie dans les derniers millimètres avant que l'armature touche les pôles de l'électro. Donc un mauvais rendement mécanique.

– Le second, d'ordre électrique, était celui qui, simultanément pendant ces 40 ans, retardait la réalisation d'un générateur de courant continu performant, l'inéluctable accumulation d'énergie dans l'inductance élevée d'un électroaimant.

C'était même plus grave pour le moteur car lorsque le courant d'un électro était interrompu, son intensité était à sa valeur maximale. L'énergie à dissiper dans l'arc de cet extra-courant de rupture était alors forte, causant la détérioration des pièces du commutateur.

La solution était identique pour le moteur, ne pas interrompre le courant, c'est-à-dire appliquer le champ inducteur sur un bobinage fermé, par exemple enroulé sur un anneau.

– Le troisième problème était une question économique facile à comprendre, mais que beaucoup n'intégraient pas dans leur exploration. Ce moteur n'était qu'une spéculation intellectuelle, un jouet scientifique, tant qu'il n'y aurait que des piles pour l'actionner. Au-delà de la puissance trop faible des piles, c'était le surcoût prohibitif de leur énergie, résultant de l'oxydation du zinc, comparée à la même énergie obtenue par combustion du charbon, pour le moteur à vapeur.

L'anglais Jenkin l'avait calculée : l'énergie calorifique du zinc est par kg, 1/10 de celle du charbon, le rendement du moteur à vapeur étant de 10%, celui du moteur électrique au mieux 40%, le prix du zinc au kg était de 20 fois celui du charbon, la même énergie mécanique fournie par la pile alimentant un moteur était 50 fois plus chère que celle fournie directement par le charbon.

### Moteurs en anneau

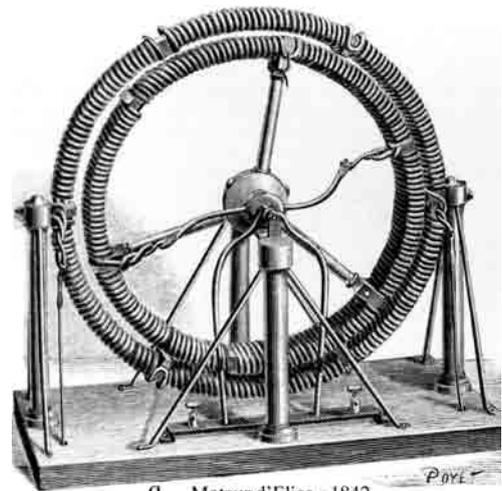
L'enroulement d'un bobinage continu sur un anneau devait être une solution pour supprimer les étincelles de coupure, plusieurs l'ont envisagée, mais incomplètement, avant que la bonne solution soit enfin trouvée dans les années 1870.

– Le premier était assez ancien, conçu en 1842 par le hollandais **Elias** (q), avec deux anneaux, l'un extérieur fixe, l'autre intérieur tournant. Sur le premier était enroulé un fil continu divisé en six circuits dont le sens d'enroulement était successivement inversé, formant six électroaimants. L'anneau intérieur portait aussi six enroulements, mais le courant dans chacun était inversé six fois par tour par un petit commutateur. Ce système original à bobinages multiples en série sur un anneau fut un pas en avant qui a influencé les suivants. Il était réversible, c'est-à-dire pouvait fonctionner en génératrice, propriété sans intérêt.

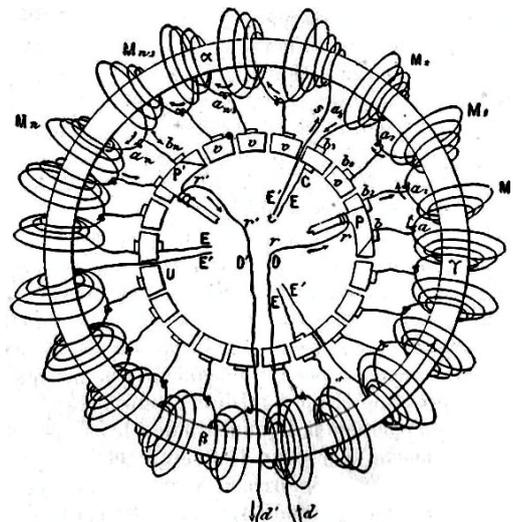
– L'italien **Bessolo** reprenait, en 1853, l'anneau d'une façon bien améliorée, l'enroulement continu était subdivisé en une série de bobines en série, mais à chaque intervalle entre bobine, un fil dérivait le courant sur une touche fixée sur un disque où s'appuyaient deux frotteurs reliés à la pile (r). Un brevet fut pris en France en 1855, au nom de H. Gilbee.

On reconnaît précisément l'anneau, avec son collecteur, utilisé plus tard dans le moteur Pacinotti comme dans le générateur Gramme. Mais il était utilisé différemment : l'anneau était fixe, les frotteurs tournants alimentaient progressivement un tiers du bobinage sans rupture de circuit donc sans étincelle. À l'intérieur de l'anneau creux pouvait tourner un tronçon torique limité à un tiers de la circonférence, à la vitesse de rotation des frotteurs, entraînés par un système non décrit.

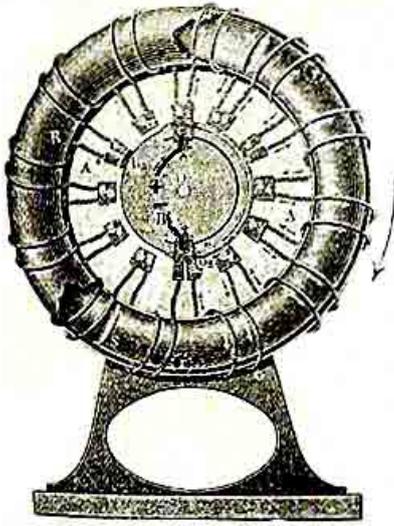
C'était un appareil d'expérience, mais pas vraiment un moteur, puisque le tronçon torique enfermé dans l'anneau ne pouvait transmettre mécaniquement sa rotation à l'extérieur.



q Moteur d'Elias - 1842



r Moteur en anneau de Bessolo - 1855



l Moteur Kravogl - 1867



u Mantelringdynamo de Kravogl

Du

Moncel conclut sa description : « ... Au point de vue des combinaisons électriques ce moteur est très remarquable...on doit lui attribuer l'honneur d'avoir le premier indiqué la forme d'enroulement sectionné et le collecteur à touches séparées, qui sont les points essentiels des machines actuelles, mais comme utilité pratique il n'a pas grande importance » (2).

– Il a influencé les suivants Kravogl, un voisin du Sud Tyrol, de même qu'un compatriote, le professeur Pacinotti père ou fils. À l'exposition universelle de Paris en 1867 était présenté au stand de l'Empire d'Autriche un appareil original inventé vers 1856 par **Johann Kravogl**, *elektromotrisches Krafrad*, une sorte de *roue motrice*. À défaut d'information claire permettant de comprendre le fonctionnement de ce moteur, le croquis (t) montre un bobinage torique fermé, constitué de multiples bobines mises en série, dont chaque jonction est reliée à une touche d'un commutateur. Des frotteurs + et - alimentent en courant la moitié du bobinage. Ce bobinage qui paraît fixe ressemble à celui d'Elias, surtout avec un collecteur comme celui de Bessolo. On ne comprend pas bien comment tourne le commutateur, avec quel bobinage. Le moteur présenté à Paris était totalement enveloppé dans une enveloppe métallique dont on ne saisit pas la fonction. Cette enveloppe a été retirée à moitié sur ce modèle postérieur (u).

Kravogl, mécanicien, présentait aussi d'autres inventions intéressantes : un véhicule à air comprimé, une pompe à vide au mercure, un fusil à répétition ; il reçut une médaille d'argent et l'empereur François Joseph, visitant l'expo, lui a donné 2000 guldens et une médaille d'or. À l'exposition de 1873 à Vienne, son moteur mérita une médaille de bronze (3).

– L'étape suivante dans cette recherche d'un bon moteur fut presque concluante, le moteur conçu par **Antonio Pacinotti** en 1861, à l'époque où à 20 ans il débutait dans le professorat de mathématiques et travaillait dans le cabinet de physique de son père (s), bénéficiant de son expérience. Ce moteur, s'il n'était pas le premier en anneau avec collecteur, fonctionnait avec le principe de la roue de Barlow, obtenir une force sur chaque spire parcourue par le courant de la pile, par application d'un champ magnétique. Naturellement réversible comme celui de



s Machinetta Pacinotti - 1861

Jacobi, Pacinotti avait fait valoir en 1871 à l'Académie de Paris la possibilité de l'utiliser en générateur, avant celui de Gramme. Il a été longuement décrit au chapitre II-3.

La machine de Pacinotti, un prototype de laboratoire, a été présentée à l'exposition de Vienne en 1873, puis à Paris en 1881, mais n'a jamais évolué vers une version industrialisable.

Nombre d'inventeurs se contentent de l'idée, un principe appliqué à une maquette, mais s'arrêtent devant le plus difficile, rendre leur invention réalisable industriellement, le talent des développeurs.

### Les moteurs-générateurs réversibles

Cette longue quête sans résultat vers le moteur électrique se révéla inutile, lorsque l'autre recherche en parallèle vers un générateur électro-mécanique déboucha enfin après 1870.

On découvrit alors que ce générateur était aussi un moteur. Il était réversible ! La même machine peut transformer l'énergie mécanique en énergie électrique ou l'inverse, et ceci avec un bon rendement dans chaque sens. Merveilleuse magie de la réversibilité

À remarquer que les grosses machines n'étaient pas appelées "moteurs", mais "dynamos" ou "machines", quel que soit leur usage, produire de l'électricité à partir de l'énergie mécanique, ou l'inverse.

Avant 1881, les deux machines puissantes capables de fournir de l'énergie mécanique étaient donc celles de Gramme et celle de Siemens ; leur intérêt comme moteur ne fut vraiment perçu qu'après l'exposition, avec l'émergence du nouveau concept de transport de force.

#### *Le calage des balais*

Cependant, un détail important fut découvert pour faire passer un générateur en moteur ou vice-versa, il faut lui apporter une modification, le calage des balais par rapport à ligne neutre théorique. Ceci pour éviter la destruction progressive du collecteur par des étincelles de commutation, maladie générique de cette machine à collecteur.

En générateur, il fallait déplacer les balais un peu en avant, dans le sens de rotation. La raison, comprise plus tard, était ce que les spécialistes appellent la *réaction d'induit*. Plus forte dans l'anneau Gramme que le tambour Siemens, ce fut d'ailleurs l'une des raisons de l'abandon de l'anneau vers 1900.

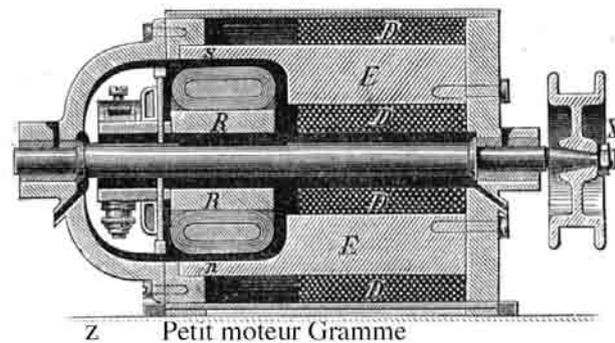
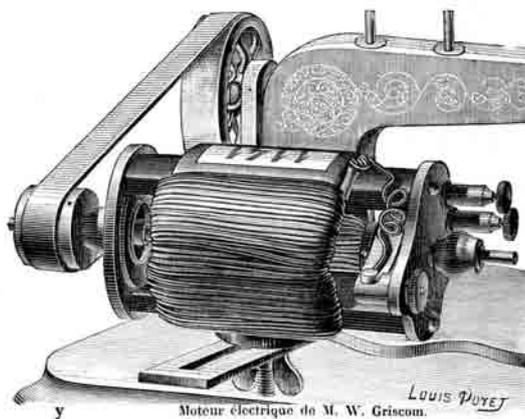
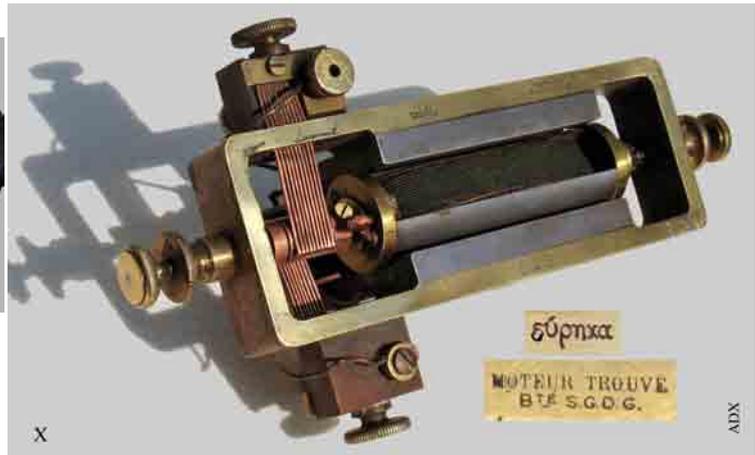
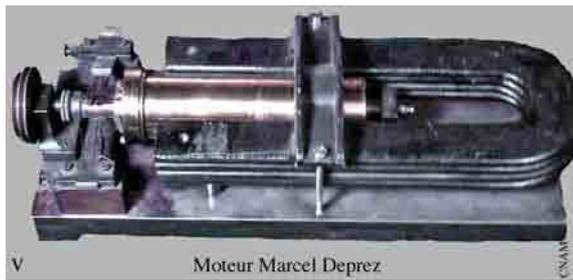
Par contre en moteur, il fallait à l'inverse décaler les balais en sens inverse du sens de rotation.

#### *En alternatif*

Lorsque l'on « découvrira » après 1885 la supériorité d'un nouveau type d'électricité, l'alternatif, le problème du moteur se reposera impérativement. La réversibilité ne fonctionnait qu'imparfaitement. Le moteur synchrone, réversible avec l'alternateur, tourne bien s'il est lancé, mais ne démarre pas seul. Il faudra plusieurs années de travail aux équipes attaquant ce difficile problème de l'invention du moteur asynchrone à induction.

### Les petits moteurs

Machines de petite puissance, ils étaient destinés à des tâches artisanales. Bien que coûteuse, leur alimentation par piles était envisageable, tant que la distribution collective de l'électricité n'était pas apparue. Parmi les multiples modèles inventés, utilisant presque tous l'induit allongé en double T de Siemens, figurent ceux de Marcel Deprez (v), futur promoteur du transport de force.



Le plus réussi de ces petits moteurs fut celui que présenta à l'Académie **Gustave Trouvé**, inventeur habile et constructeur d'appareils électriques variés. Comme les autres, il utilisait la bobine Siemens, mais pour éviter son couple moteur saccadé à chaque demi-tour, il disposait l'enroulement dans une encoche asymétrique, légèrement en spirale de deux mm ; le couple moteur devenait plus progressif et la puissance était augmentée (5). Pour symboliser sa marque, il avait avec humour emprunté à Archimède son célèbre *eurêka*, *j'ai trouvé*, phonétiquement son nom « *G. Trouvé* » (x).

Il améliora nettement sur la Seine l'expérience de Jacobi sur la Néva, le moteur de sa barque remontait le courant à sept km/h, avec une douzaine de piles au bichromate. Les Anglais firent naturellement mieux, l'*Electricity*, plus puissant, remonta la Tamise à neuf milles à l'heure, mais avec plus d'une tonne d'accumulateurs.

L'américain Griscom avait bien adapté son moteur à la machine à coudre (y).

Plus tardivement, vers 1889, la Société Gramme mit aussi à son catalogue un petit moteur pour les ateliers d'artisans raccordés à un réseau (z).

Quel est l'inventeur du moteur à courant continu ? Le lecteur aura du mal à choisir.

## Compléments

1- Moritz Hermann **von Jacobi** (1801-1874). Né à Potsdam, il fut professeur à Dorpat et partit s'installer à St Petersburg en 1837. Il était le frère du mathématicien Carl Gustav Jakob Jacobi. Physicien et chimiste, il travailla sur les moteurs électromagnétiques, découvrit en 1837 la galvanoplastie en même temps que Spencer en Angleterre et fut conseiller de l'Empereur pour la télégraphie

3- THÉODORE DU MONCEL et FRANK GÉRALDY, *L'Électricité comme Force motrice*, Hachette, Paris, 2<sup>e</sup> édition 1884, l'un des bons livres sur les moteurs. Du Moncel ne décrit pas ce moteur dans sa

première édition. Il signale que ce moteur original, inconnu jusque-là en France, ne l'a été que récemment, signalé par **Bessolo** lui-même.

### 3 - Documents sur **Kravogl**:

- GRANICHSTAEDTEN-CZERVA RUDOLF, *Johann Kravogl, Erfinder des Elektromotors*, 1929.
- Beiträge zur Technikgeschichte Tirols, Heft 1, OIAV, 1969, p.58/68.
- Quelques éléments partiels sur internet.

**4 - La puissance mécanique** s'exprimait jusqu'en 1952 en **cheval-vapeur**. L'abréviation ancienne étant **cv**, parfois **hp**, le horse power anglais, un peu plus élevé, ou **ps**, Pferde Stärke, en Allemagne et **ch** depuis qu'il n'est plus une unité usuelle. Actuellement, l'abréviation CV désigne encore en France la puissance "fiscale" des moteurs de voitures, rien à voir avec la puissance réelle.

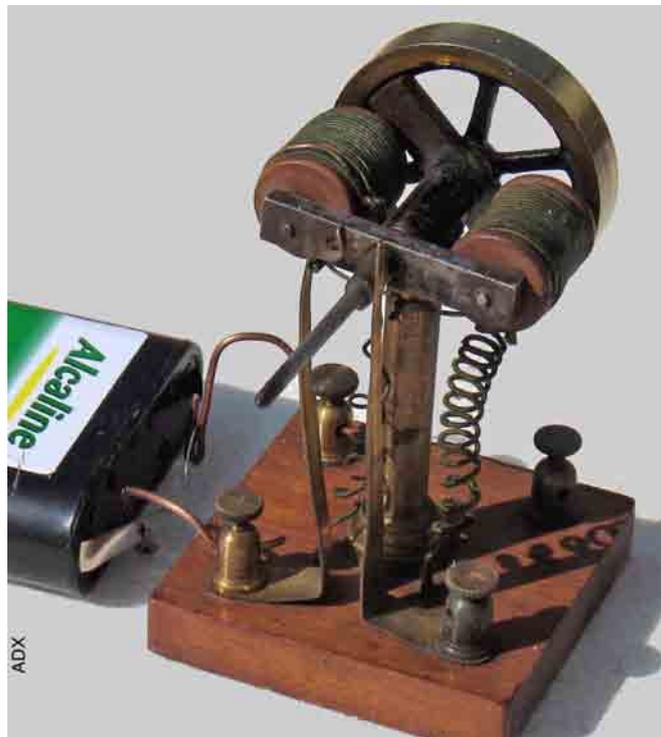
La puissance mécanique comme électrique s'exprime depuis 1961 en **watt, W**.

Beaucoup pensent encore qu'il s'agit d'une puissance électrique, bien que Watt ait été l'un des inventeurs anglais du moteur à vapeur, avant l'électricité.

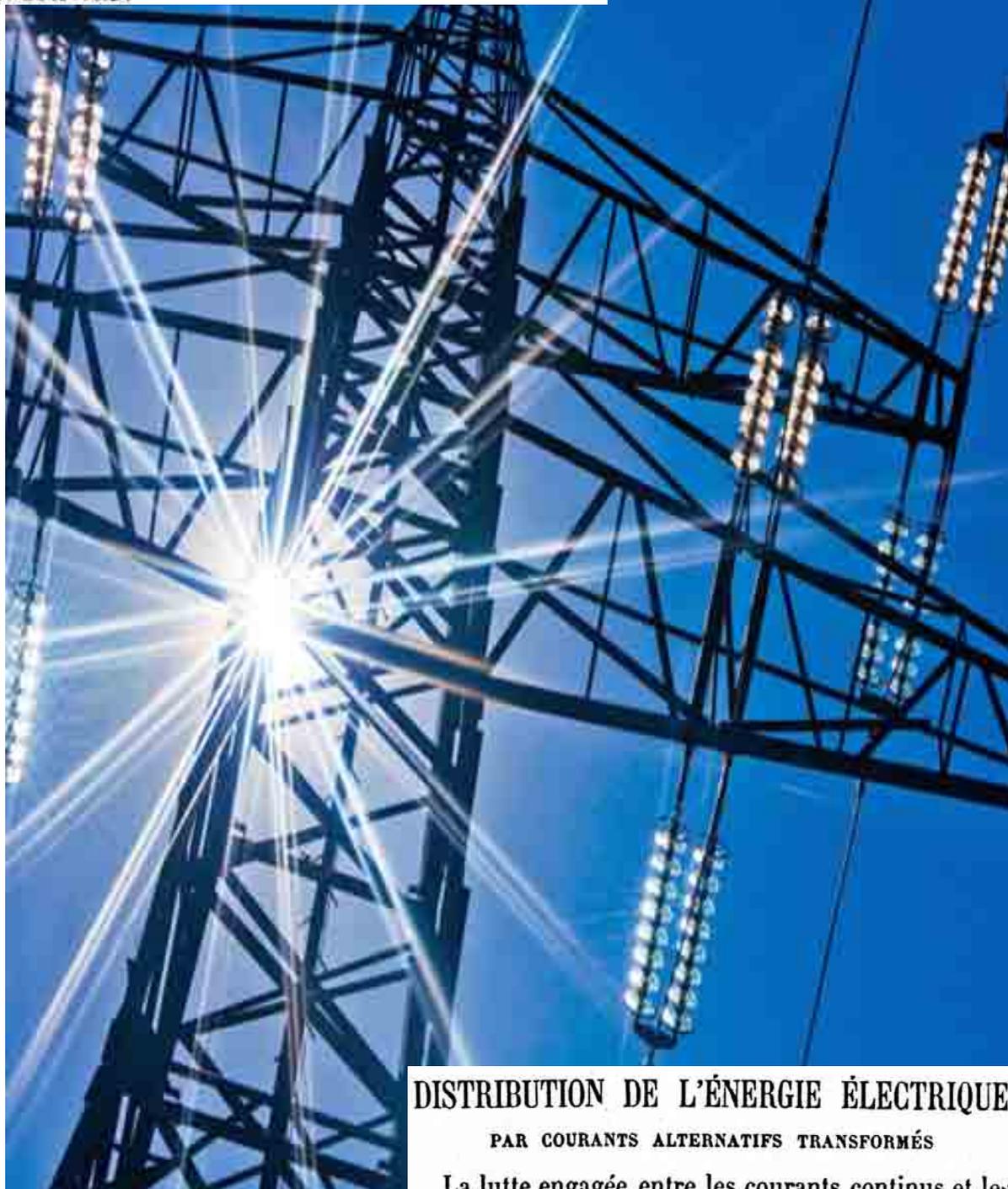
1 ch = 736 watts - un hp = 746 watts.

Dans ce livre, a été adoptée l'abréviation **ch**, le cheval-vapeur étant seul utilisé au XIX<sup>e</sup> siècle

**5 - L'invention du **moteur Trouvé**** est décrite plus précisément, d'après *La Nature* : Les faces polaires, au lieu d'être des portions d'un cylindre dont l'axe coïncide avec celui du système, sont en forme de limaçon, de telle sorte qu'en tournant elles approchent graduellement leurs surfaces de celles des aimants, jusqu'au moment où le bord postérieur échappe le pôle de l'aimant. L'action de répulsion commence alors, de sorte que le point mort est pratiquement évité. L'idée est très pertinente.



**Les forces naturelles** qui ne coûtent rien et qui sont aujourd'hui perdues, pourront être utilisées par l'industrie. La force de la chute d'eau sortira de la gorge inaccessible, celle du vent descendra de la colline abrupte, celle de la marée, immense et inutilisée, pourra être saisie et transmise hors de la portée des vagues. C'est l'aurore d'une révolution industrielle.



## DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

PAR COURANTS ALTERNATIFS TRANSFORMÉS

La lutte engagée entre les courants continus et les courants alternatifs est plus vive que jamais; sans qu'on puisse prévoir encore qui l'emportera...

1881		1891
transport de		
20 CV		200 CV
	à	
1 Km		175 Km
	sous	
110 V continu		15 000 V alternatif triphase

<p style="text-align: center;"> <b>TRANSPORT ÉLECTRIQUE</b>  <small>DE</small>  <b>LA FORCE</b>  <b>A GRANDE DISTANCE</b> </p>
--

## La guerre des courants

À l'époque, l'énergie mécanique était désignée par *la force* le terme *énergie* n'apparaissait pas, la seule envisagée étant l'énergie mécanique. Il n'y avait pourtant pas de confusion avec ce que nous appelons la force, que l'on appelait alors *l'effort*.

Pour rester dans l'air du temps, continuons donc à dénommer l'énergie par le terme *force*.

Très supérieur aux forces naturelles du vent et de l'eau, aux forces animales et humaines, le moteur à vapeur avait déclenché la révolution industrielle. Il nécessitait d'extraire des tonnes de charbon, de les transporter grâce à la locomotive à vapeur, machine lourde et bruyante, avec ses fumées, et parfois explosions mortelles.

La nouvelle force électrique qui devenait disponible à partir des années 1876/1880 était produite essentiellement à partir du charbon. Elle ne pouvait certes pas le remplacer puisqu'elle n'était qu'un vecteur d'énergie, mais l'on pressentait qu'un jour elle serait transmise au loin jusqu'à des machines motrices, les moteurs électriques. Une opportunité s'ouvrait ainsi pour l'hydraulique, la force des chutes d'eau, cette *force naturelle* déjà exploitée, mais intransportable.

Ce transport de force allait se révéler très limité avec l'électricité en courant continu qui régnait en maître incontesté ; la solution au problème se révélera progressivement être le courant alternatif grâce à son transformateur. Il faudra alors presque tout revoir, connaissances théoriques, utilisation et matériels avec cette nouvelle forme d'électricité inexplorée et plus complexe.

La décennie 1881–1891 fut ainsi très animée pour les électriciens de tous les pays. Ce n'était pas un problème théorique, mais de multiples expériences à concevoir par des innovateurs, déclenchant des controverses et une véritable *guerre des courants* en France et aux Etats-Unis. Comme toujours en toute science et technique, ce n'était pas une guerre d'opinions, mais de preuves technico-économiques et de faisabilité à démontrer par des expériences indiscutables.

### Transporter l'énergie hydraulique, avant l'électricité (1)

L'enjeu du transport de la force hydraulique était capital, à en juger par les prouesses techniques développées pendant 60 ans vers cet objectif. Peu connues, rappelons en brièvement les péripéties pour mieux comprendre l'importance de l'électricité, seule solution capable d'assurer enfin la déconnexion géographique entre le lieu d'utilisation de l'énergie et celui de sa production.

Depuis des millénaires, l'homme utilisait la *force* de l'eau pour faire tourner diverses roues, moteurs hydrauliques aux multiples variantes. C'était la *force naturelle* la plus exploitée, avant même le vent avec les moulins et les voiles des bateaux, avant la marée dans les estuaires, la houle ou autre.

Au début du XIX<sup>e</sup> siècle en France, 200 000 roues fournissaient environ un million de chevaux, une puissance déjà appréciable, mais très dispersée en unités de faible puissance, une dizaine de ch.

Un ingénieur stéphanois, **Benoît Fourneyron**, réussit enfin à inventer en **1827 la turbine**, véritable moteur hydraulique bien plus performant et pratique que les roues. C'était l'aboutissement tant attendu depuis deux siècles, des recherches de mathématiciens et praticiens, Bernoulli, Bossut, Euler, Smeaton et autres. Installant d'abord sa turbine sur les basses chutes, Fourneyron l'applique en 1837 à deux hautes chutes de plus de 100 mètres, en Bavière, en canalisant l'eau dans une conduite forcée sous pression, d'abord en fonte. Cette invention de la turbine et son corollaire, la conduite forcée représentait pour l'énergie hydraulique un saut technique, comparable à celui de la dynamo par rapport à la pile.

En ce milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, le moteur à vapeur aurait pu trouver un concurrent dans la turbine, ce ne fut pas le cas. En effet, ce nouveau moteur hydraulique avait un handicap majeur, celui de ne pouvoir entraîner des machines qu'en installant l'usine au pied de la chute d'eau, à côté de la turbine, comme les antiques roues. Avec le moteur à vapeur, il suffisait de transporter du charbon.

Pendant 60 ans (1830-1890) l'énergie hydraulique fut donc loin d'exploiter son potentiel disponible, pourtant fortement accru par la turbine. Finalement, les deux techniques associées, hydraulique et électricité, se juxtaposèrent simplement pour devenir l'**hydroélectricité**, qui bénéficiera des progrès indépendants de chacune.

Néanmoins, pendant ces 60 ans, les ingénieurs ont laborieusement imaginé et mis en œuvre différentes solutions permettant de bien modestes transports de la force hydraulique à de courtes distances du site de production.

### *Transport mécanique*

Le plus répandu, à des distances de quelques dizaines de mètres au plus, était le classique arbre de transmission mis en rotation par poulie et courroie depuis la turbine, ou du moteur à vapeur, et distribuant sur toute sa longueur l'énergie aux machines attelées aussi sur cet arbre par poulies et courroies. Le record a été semble-t-il celui de Neuhausen sur le Rhin, où 405 ch étaient transportés jusqu'à 58 m.

En 1850, des mécaniciens, les frères Hirn, remplacent la courroie de cuir par un câble en acier, toronné comme les cordes en chanvre et formant une boucle sans fin, en reliant les deux bouts par une épissure de marin. Ces longs *câbles téléodynamiques* étaient actionnés à une extrémité par la roue motrice et entraînaient à l'autre la poulie de la machine. Ils étaient supportés sur leur parcours par des roues à gorge intermédiaires. Des centaines de ces câbles ont fonctionné dans les Alpes suisses et françaises. L'installation la plus puissante a été celle de Bellegarde sur Rhône, dans le Jura, en 1872, transportant 3000 ch à 1,3 km. Pour aller plus loin, il fallait imaginer autre chose.

### *Transport par air comprimé*

Il fut pratiquement inventé pour le percement du premier tunnel des Alpes sous le Mont Cenis. Il fallait abattre à la mine 12 km de roches, c'est-à-dire percer des dizaines de milliers de trous de mine avec pic et marteau pour y introduire la poudre explosive. Avec ce procédé, on avançait de 0,6 m par 24 h. Les câbles téléodynamiques furent envisagés pour actionner de nouvelles perforatrices, mais abandonnés en raison de la distance excessive atteignant jusqu'à 6 km. Finalement le jeune ingénieur suisse, Daniel Colladon, démontra que l'air comprimé était viable pour alimenter des perforatrices à air comprimé, lequel serait amené par des tuyaux en fonte depuis une station de compression établie à chaque extrémité du tunnel. Par surcroît, le renouvellement d'air au fond de la galerie s'en trouvait assuré. Mais quelle énergie utiliser pour animer les compresseurs ? Le moteur à vapeur a priori, mais qu'il faudrait approvisionner en charbon depuis des mines très éloignées. Cavour proposa alors au Parlement de Turin en 1854 l'énergie du *carbone bianco*, la **Houille blanche** (2), disponible grâce aux

torrents coulant aux deux extrémités, Bardonnechia et Modane. Le tunnel commencé en 1857 fut achevé en 1871.

L'air comprimé fut souvent utilisé ailleurs comme vecteur d'énergie. La société Popp l'a ainsi distribué pendant des années dans Paris (III-5). Le marteau-piqueur, outil indispensable des travaux publics, est le descendant des perforatrices du sarde Sommeiller. Il est toujours à air comprimé, bien que l'on ait tenté de le faire fonctionner à l'électricité.

### *Transport par eau sous pression*

Il consiste à comprimer de l'eau avec l'énergie d'une turbine, la transporter par tuyauteries jusqu'au point d'utilisation, pour y faire tourner une autre turbine motrice, attelée à la machine d'utilisation. Le procédé fut souvent adopté, à Londres en particulier. La réalisation la plus spectaculaire fut concrétisée à Genève en 1886 et exploitée pendant un demi-siècle. Dans l'usine encore existante avec tout son matériel d'époque, *La Coulouvrenière*, les turbines motrices tournaient avec le fort débit et les quelques mètres de chute du Rhône à sa sortie du lac. Les pompes qu'elles entraînaient distribuaient l'eau chez les utilisateurs dans deux circuits, l'un à 6,5 bars, l'autre à 14 bars, totalisant une puissance de 3000 ch. Le jet d'eau actuel du lac Léman en reste d'ailleurs un avatar.

Que d'efforts, alors que l'électricité va résoudre le problème efficacement et économiquement. Il faudra dix ans d'essais et de controverses, et la redécouverte du courant alternatif pour enfin déconnecter l'utilisation de l'énergie hydraulique des lieux de production.

### **Débuts du transport de force par l'électricité**

Si l'on cherche « le premier qui »...a transporté la force par l'électricité, H. Fontaine et C. Félix sont sur les rangs, pour avoir à l'exposition de Vienne en 1873, alimenté un moteur avec 2 km de fil à partir d'une génératrice (II-3). Depuis la commercialisation en 1875 des premières dynamos, à la fois génératrices et moteurs, d'autres avaient dû faire aussi ce genre d'expérience.

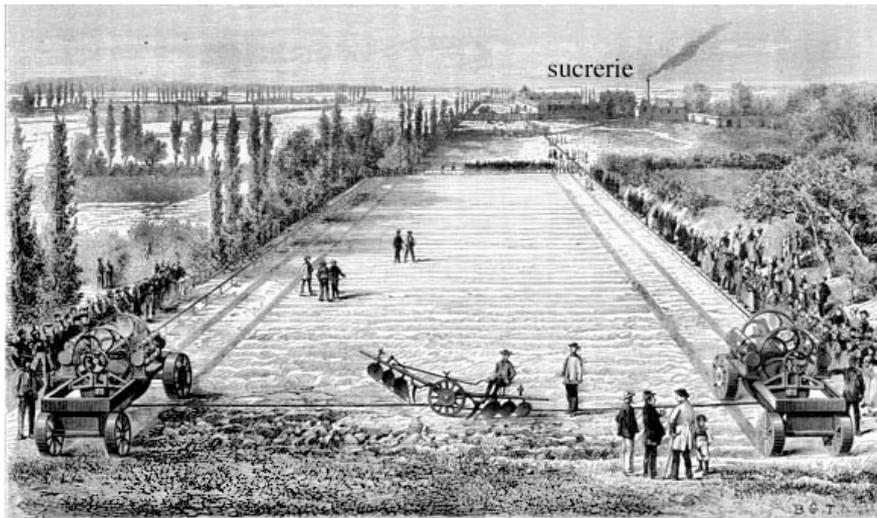
**Au cours de l'année 1879**, avant l'exposition de Paris, des physiciens de renom ont envisagé ou réalisé à petite échelle ce transport de force électrique :

- en Angleterre, Sir William Thomson et Wilhelm Siemens ont expliqué devant le Parlement que toute la puissance de la chute du Niagara pourrait être transporté à une distance de 500 milles ou plus, par un câble de cuivre de 1/2 inch de diamètre, véhiculant un courant de 240 A à la tension de 80 000 volts. Ce n'était que l'application des lois connues de Joule et d'Ohm, mais comment obtenir une telle tension à l'époque du 100 V et isoler un câble à un tel niveau ? Un rêve totalement utopique.

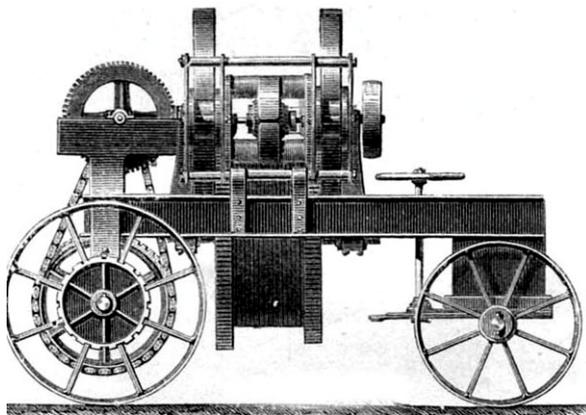
- en août 1879, le professeur W. Edward Ayrton faisait à Sheffield des conférences à 4000 ouvriers dans le cadre des cours du soir, expliquant comment on pourrait transporter la force par l'électricité. Dans une vingtaine d'années, elle serait générée avec le charbon depuis les mines, ou à partir des nombreuses chutes d'eau inutilisées (3).

- aux États-Unis, le débat sur l'exploitation du Niagara, dont la puissance faisait rêver les ingénieurs, était animé par Elihu Thomson et son futur associé, Edwin J. Houston. Ils démontraient sa faisabilité théorique dans le *Journal of the Franklin Institute*, mais doutaient qu'il serait possible d'avoir un rendement supérieur à 50 %, chiffre fatidique.

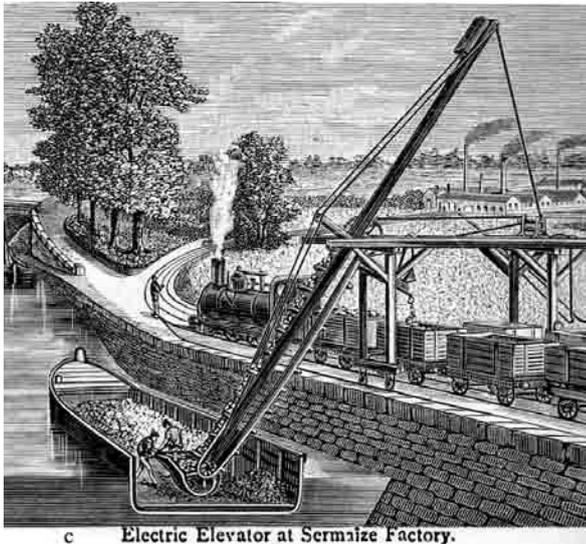
- en Allemagne, à l'exposition de Berlin, Siemens transportait des voyageurs sur 300 m avec un embryon de tramway électrique. Début prometteur.



a Labourage électrique à Sermaize - 22/05/1879



b Chariot de labourage électrique



c Electric Elevator at Sermaize Factory.

– en France, une démonstration de labourage par la force électrique fit quelque bruit. C. Félix, directeur d'une sucrerie à base de betteraves, à Sermaize dans la Marne, présenta aux spécialistes et à la presse le système qu'il avait conçu avec l'ingénieur J. Chrétien. Sur la gravure (a) la charrue est tractée dans chaque sillon de 220 m, alternativement par l'un ou l'autre des chariots qui sont déplacés sur le bord du champ. Sur chacun (b), une machine Gramme fait tourner un treuil à

câble relié à la charrue. La génératrice, installée à l'usine à côté du moteur à vapeur, est du type octogonal, spéciale pour forte puissance, connectée au conducteur de 3 mm<sup>2</sup>, long de 400 ou 620 m suivant le champ à labourer. Avec un conducteur de 10 mm<sup>2</sup>, on a labouré à une distance de 2 km. Le rendement global serait un peu plus de 50%, entre l'énergie mécanique du moteur à vapeur et l'énergie transmise à la charrue, qui recevait 3 ch. Le système permettait de labourer 30 à 40 ares par heure, deux fois plus qu'avec un attelage à chevaux. Les ingénieurs de Sermaize ont équipé aussi une grue électrique qui prenait les betteraves directement dans les bateaux et chargeait les wagons pour les transporter à la sucrerie (c).

L'économie de main-d'œuvre était de 40 % et la consommation de charbon du moteur de l'usine de 1 kg par cheval, par heure. Pour transporter 4000 tonnes de produits par an, c'était rentable. Le labourage avait toujours été le travail de la terre nécessitant le plus d'énergie humaine ou animale, mais depuis le milieu du siècle, on tentait en Angleterre de le faire avec des locomobiles, machines à vapeur autonomes. Très lourdes (moteur à vapeur, chaudière, charbon et eau) elles consommaient beaucoup trop de charbon, 6 kg par ch/h mécanique produit, alors que les bons moteurs statiques à vapeur consommaient 1 kg par ch/h.

L'électricité apparaissait comme une solution attractive, surtout pour ce type d'exploitation, ayant déjà besoin d'un moteur à vapeur pour le fonctionnement normal de la sucrerie.

– un autre procédé de transport d'électricité à distance, le système d'éclairage Brush alimentait ses lampes à arc en série, à une tension élevée, 800 V ou plus.

Si une lampe s'éteignait, un dispositif la court-circuitait automatiquement. À Londres en 1880, sur chaque circuit, 33 lampes étaient réparties sur 5 km.

De même à Paris lors de l'exposition, l'Opéra était éclairé par Brush à 2 km du générateur installé au Palais de l'Industrie.

- à Berlin, début 1881, le premier tramway Siemens de Lichterfelde recevait son énergie jusqu'à 2,5 km de la génératrice.

- à l'exposition de 1881, J.Chrétien évaluait à 17 millions de ch *la force naturelle* de l'hydraulique, disséminée dans toute la France et pensait qu'il était possible d'en exploiter au moins 1 million de chevaux en la transportant à l'aide de l'électricité.

- au Congrès qui clôtura la manifestation une affirmation de Deprez provoqua des débats : *Le rendement est théoriquement indépendant de la distance*. Il démontrait par le calcul qu'avec une machine Gramme type C, on pouvait recevoir 10 ch au bout d'une ligne de 50 km, en fil télégraphique ordinaire, avec 16 ch au départ, soit un rendement de 65%.

- dans la *Revue scientifique*, Gustave Lebon affirmait : *Il y a une impossibilité scientifique à jamais transporter l'électricité à de grandes distances*. Précisons que Lebon était président de la *Société de distribution de la force par l'air comprimé*, vecteur d'énergie concurrent de l'électricité (4).

Surtout, le transport de force électrique impliquait la **résolution de plusieurs problèmes** :

- d'abord élever la tension. Tout le monde savait que, d'après les lois connues, c'était indispensable pour diminuer le courant, donc les pertes.

- mais comment élever la tension au départ et à quel niveau ? Et comment la rabaisser à l'arrivée à un niveau d'utilisation, 100 V pour l'éclairage ?

- comment va se comporter une ligne à tension élevée, suspendue sur de nombreux supports en principe isolants ? Il y aura des fuites de courant et peut-être d'autres phénomènes atmosphériques mal connus comme la foudre.

Des essais réels s'imposaient, en augmentant progressivement tension, puissance et distance, avec différentes solutions.

Programme qui va demander dix années.

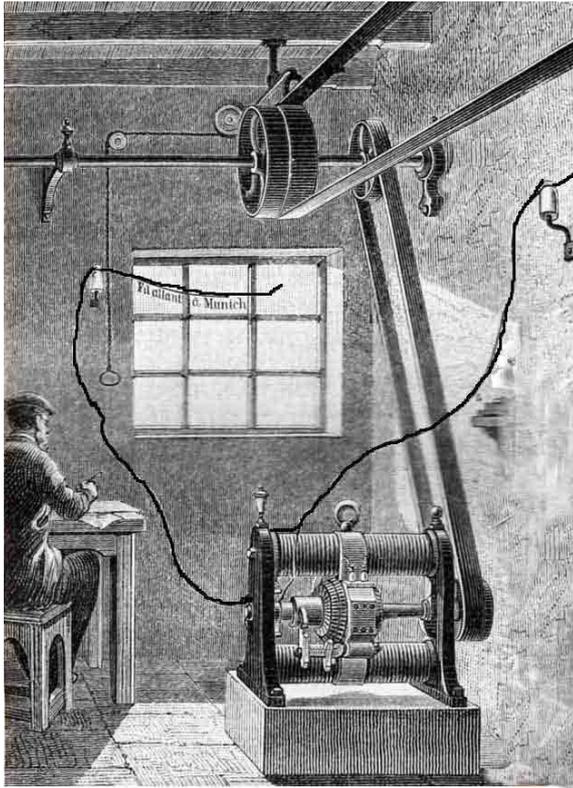
### **Expériences de Marcel Deprez, en courant continu à haute tension**

Dans chaque pays, le problème du transport trouvait des physiciens, ingénieurs ou praticiens attachés à le faire avancer concrètement. En France, Deprez en fut la vedette pendant plusieurs années. À l'exposition, il avait présenté l'expérience d'un circuit long de 1,8 km distribuant l'électricité à 27 utilisations (III-4). Elle démontrait qu'il était possible de réguler la production d'énergie d'un générateur, afin d'alimenter de multiples utilisateurs dont la consommation était variable. Cela nous paraît évident, mais c'était l'un des problèmes des futurs réseaux de distribution. Le 15 juin 1882, au cours d'une conférence sur ce thème au Conservatoire des Arts et Métiers, il fait l'essai de transmettre une puissance d'un cheval, à travers une résistance équivalente à 50 km de fil télégraphique.

Remarquons cette analogie, qui réapparaîtra souvent, entre les deux grands usages de l'électricité, le fil télégraphique transmet l'information, il doit aussi pouvoir aussi transmettre l'énergie. Étaient seuls encore commercialisés, le fil en bronze siliceux pour le télégraphe, en cuivre pur pour les machines.

#### *Expérience de Munich - septembre 1882*

Après Paris en 1881, la Bavière allemande organisait dès l'année suivante une grande exposition consacrée à l'électricité au Palais de Cristal de Munich. On renouvela en mieux les présentations de Paris. L'organisateur, **Oskar von Miller**, jeune ingénieur des services techniques royaux de Bavière, organisa un concours sur le sujet d'avenir, le transport de force. Il invita Deprez à venir avec ses machines, lui-même se chargeant de la ligne et de l'installation.



d Génératrice à Miesbach

La grande firme berlinoise Siemens déclina. La société Edison présenta à l'intérieur un transport d'une dizaine de mètres entre le générateur et une dynamo réceptrice faisant tourner des machines de laiterie, autant dire rien d'innovant. Schuckert, autre société allemande, présenta à l'intérieur un transport de quelques mètres figurant un atelier, mais réalisa surtout depuis Hirschau sur la rivière Isar, un transport de 5 km, par une ligne de 12,6 ohm, jusqu'à deux machines agricoles dans l'exposition. Le rendement total mécanique était de 33% ; des 9 ch produit par la turbine, 3 ch étaient reçus par les machines. C'était un début.

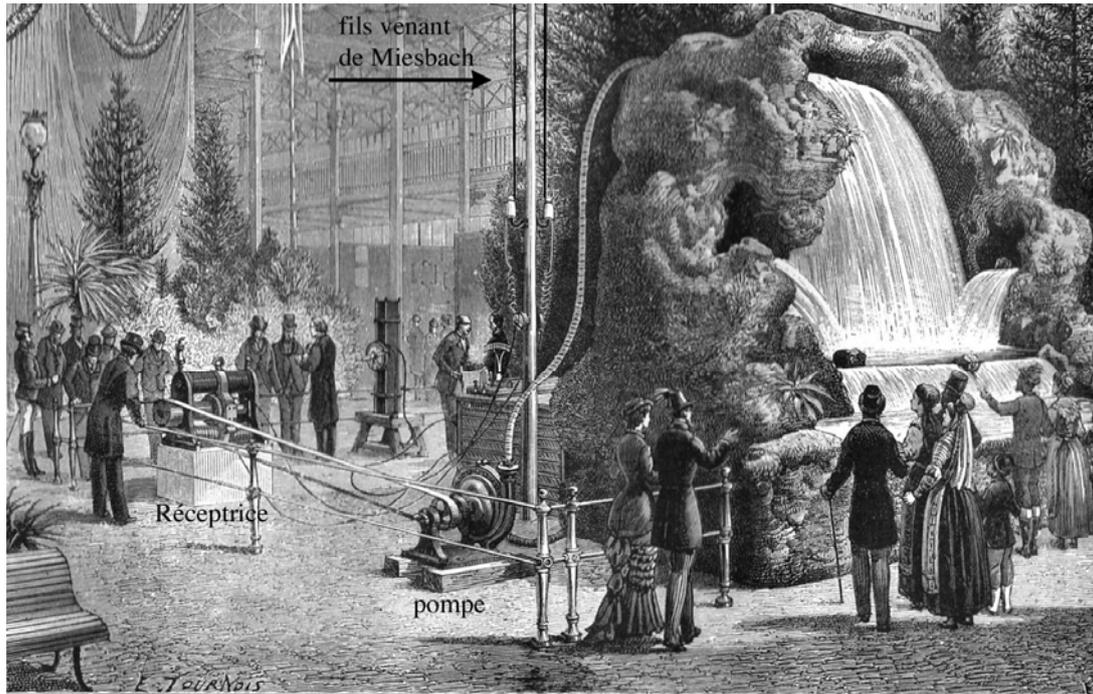
Deprez fit lui deux installations, l'une interne, un marteau-pilon électrique qu'il avait présenté à Paris, était manoeuvré par une génératrice disposée à côté (5). La deuxième relevait vraiment de la *great attraction* et devait confirmer ses calculs et annonces qui avaient beaucoup surpris, un transport d'énergie électrique à grande distance depuis la petite ville de Miesbach jusqu'à l'exposition de Munich, à 57 km.

Von Miller trouva à Miesbach un industriel, M.Fohr, dont la turbine pouvait entraîner une génératrice Gramme, conservée aujourd'hui au Musée de Munich (d). L'administration bavaroise mit à sa disposition une ligne télégraphique à un seul fil de 4,5 mm<sup>2</sup>, dont le retour se faisait par la terre, mais accepta de tirer par sécurité, en une semaine, un second fil jusqu'à Munich (e). Là-bas, la réceptrice devait faire tourner une pompe remontant de l'eau à 2,5 m pour reproduire une cascade (f).

Cette allégorie de la cascade d'eau reconstituant, grâce à l'électricité, une autre cascade lointaine, concrétisait ce rêve du transport de l'énergie hydraulique. Deprez modifia deux machines Gramme standard, en les rembobinant avec du fil plus long et de petite section pour obtenir une tension de 2000 volts, et mieux isolé pour tenir cette tension jamais atteinte.

Lorsque le 25 septembre la réceptrice de l'exposition se mit en route, ce fut une explosion d'applaudissement par les techniciens, dont beaucoup doutaient de la réussite. La ligne télégraphique étant utilisée pour l'énergie, il n'y avait plus de communication possible entre les opérateurs de Munich et ceux de Miesbach, ce qui compliqua beaucoup les manoeuvres.





f Exposition de Munich - Arrivée de l'électricité depuis Miesbach

Au bout de 8 jours, la génératrice qui tournait à 1500 tours/min eut des problèmes mécaniques. Après réparation, les essais ont permis les mesures avec des appareils mal adaptés. La tension aux bornes de la génératrice étant 1343 V, celle de la réceptrice était 850 V, d'où un rendement électrique du transport proprement dit de 38,9%. Compte tenu des pertes dans les machines, le rendement global mécanique a été estimé à 30% pour 0,25 ch transmis, soit 180 W.

Pour une première, c'était un succès, même si deux des trois objectifs de l'essai, la puissance et le rendement étaient plus faibles que ceux annoncés, seule la distance de 57 km était vraiment très importante. Il fallait recommencer cette expérience, mais avec du matériel mieux adapté. Miesbach a commémoré le souvenir de cet événement par une stèle et une plaque (g) rappelant :



*Le 16 septembre 1882 fut réalisé pour la première fois au monde, par Oskar von Miller et Marcel Deprez, un transport de force avec des courants haute tension, de Miesbach à Munich.*

### *Expérience de la Gare du Nord - mars 1883*

Deprez entreprit de concevoir lui-même une machine à plus forte tension pour de nouvelles expériences, plutôt que de faire appel aux compétences des spécialistes de machines, Breguet ou Gramme-Fontaine. Les banquiers de Rothschild qui avaient fait prospérer leur Compagnie des chemins de fer du Nord, étaient intéressés par ce nouveau domaine d'investissement et apportèrent à Deprez une aide financière, par le biais d'une société créée à cet effet, le *Syndicat français d'électricité*.

Les ingénieurs de la Cie installèrent la génératrice Deprez à côté du moteur à vapeur des ateliers de la Chapelle. Un fil télégraphique utilisé comme conducteur allait jusqu'au Bourget, à 16,5 km, et revenait à la Chapelle, sa résistance étant de 160 ohms.

Il était branché sur la réceptrice placée à côté de la génératrice, comme l'autre fil, mais très court. Cette disposition s'avéra très pratique pour les mesures aussi bien mécaniques, au frein de Prony, qu'électriques, effectuées sous le contrôle du professeur Hopkinson, venu spécialement de Londres ; mais ces deux machines installées côte à côte suscitèrent des soupçons de tricherie (h).

La génératrice était la juxtaposition sur le même arbre de deux machines identiques genre Gramme, mises en série pour atteindre 2300 V, maximum des essais. La réceptrice était une Gramme type D, rembobinée pour la haute tension. Une dizaine d'essais furent effectués en deux séries et soigneusement vérifiés. Les résultats étaient intéressants : 4,5 ch furent transmis avec un rendement global mécanique de 47%, approchant la barre symbolique des 50%, et un rendement électrique de la ligne seule de 71%.

Il y eut quelques incidents, la réceptrice était fatiguée, déjà avant les essais, la génératrice reçut la pluie à son débarquement et fut longue à sécher. Un expérimentateur, M. Cornu éprouva quant à lui une forte commotion sous 1900 V, et en réchappa avec seulement deux doigts brûlés. Le compte-rendu soigné fut discuté à l'Académie, avec vigueur par quelques-uns.

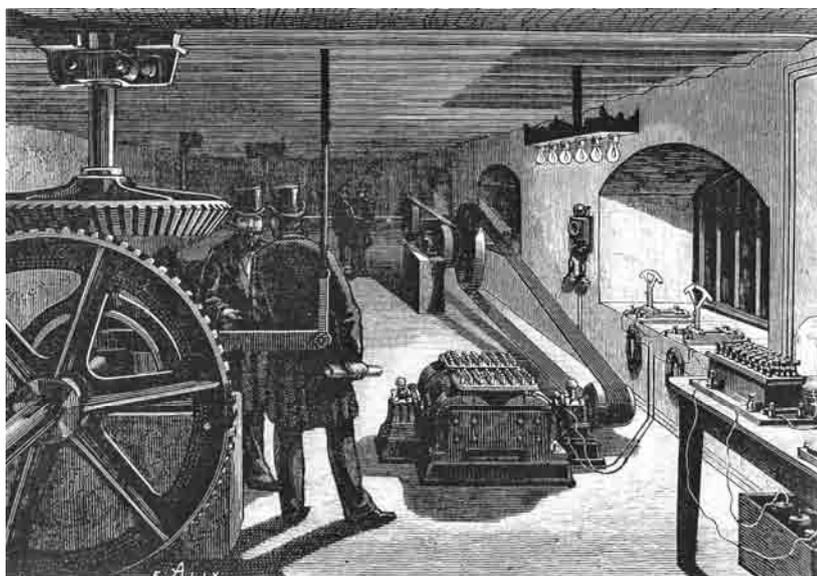
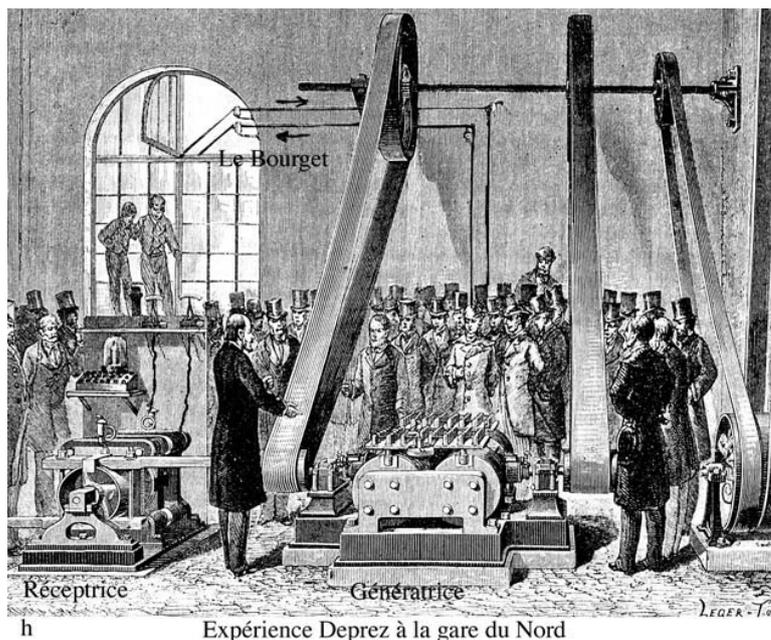
Un progrès important était accompli. Deprez et ses bailleurs de fonds songeaient maintenant à monter en puissance, mais une autre opportunité se présenta.

### *Expérience de Grenoble – août à octobre 1883*

La ville de Grenoble et ses ateliers exploitaient l'énergie de l'anthracite des mines voisines de La Mure, bien qu'entourés de montagnes, riches en torrents et chutes d'eau. Souhaitant amener cette énergie hydraulique en ville, la municipalité avait demandé à l'un des membres du Conseil municipal, Aristide Bergès, industriel exploitant déjà l'énergie d'un torrent pour sa papeterie, de piloter un projet d'adduction d'eau à Grenoble, la rivière La Rive, venant de Bourg d'Oisans, à 40 km. L'eau aurait été distribuée sous pression de 15 bars, à partir d'une station située sur les remparts, pour fournir la force aux particuliers, comme d'autres villes dont Genève l'envisageaient.

Mais la transformation de l'énergie hydraulique en électricité transportable envisagée par Deprez semblait plus prometteuse et pratique.

Le maire Edouard Rey envoya son adjoint le Docteur Bordier rencontrer Deprez à Paris.



J Génératrice Deprez à Jarrie



1

Utilisations de l'électricité reçue à Grenoble

Celui-ci accepta la proposition de venir à Grenoble reproduire ses expériences. La ville vota un budget de 5000 F et l'ingénieur Sarciaz vint à Grenoble pour préparer l'installation des machines ayant servi à la Gare du Nord, mais bien réparées. Cette fois, on transporterait par l'électricité, l'énergie hydraulique de la Romanche, produite par les turbines de la cimenterie Damaye de Jarrie, à côté de Vizille, soit à 14 km de Grenoble (j). Une ligne télégraphique fut tirée jusqu'au centre ville, à la Halle aux grains, ancienne église d'un couvent de Jacobins. Un fil supplémentaire, avec retour par la terre devait permettre de communiquer par téléphone les ordres de mise en route et arrêt pour essais, nouveauté importante qui avait bien manqué à Munich.

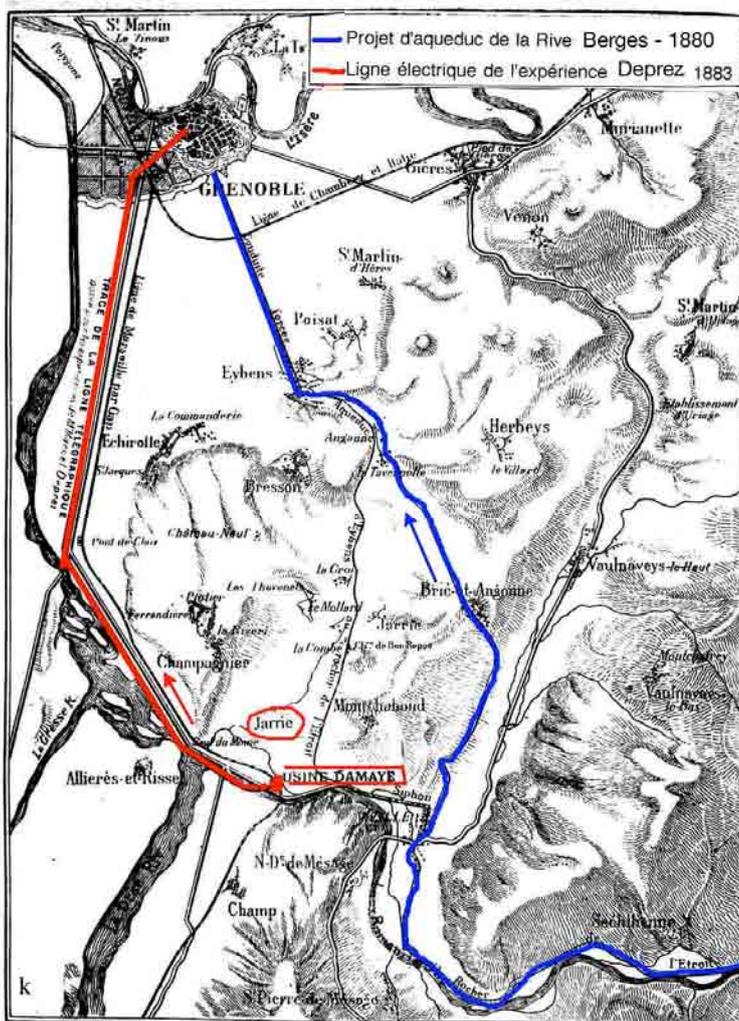
Le 2 août, le Docteur Bordier, animateur de l'expérience, fait une conférence sur le transport de la force par l'électricité devant une salle bondée.

A Grenoble, l'énergie transportée depuis Jarrie devait faire tourner une réceptrice Gramme bobinée en haute tension, entraînant mécaniquement trois machines : l'une était un générateur électrique à 110 volts pour éclairer une centaine de lampes à incandescence Edison, une autre était un générateur à basse tension alimentant les moteurs électriques de trois machines, une scie, un tour, une presse à imprimer, la troisième était une pompe relevant de l'eau à 2 m, qui devait retomber sous forme d'une belle cascade (l).

*« Le mercredi 15 août 1883 arrivent pour l'inauguration à la Halle, M. le Préfet de l'Isère, M. le Maire, ...À deux heures précises, la machine tourne et met en action une pompe qui fait jaillir une cascade magnifique au milieu des rocailles ; c'est la cascade de Vizille qui envoie sa force à 14 Km par l'électricité, et reconstitue une cascade artificielle à peine moins puissante. »*

Les machines d'atelier commencent à tourner le 7 septembre. La presse à imprimer permet alors de diffuser le numéro unique d'un nouveau journal, relatant l'évènement, *L'énergie électrique* (6). Paul Gerald, de *la Lumière électrique*, en était le rédacteur. Jusqu'au 25 septembre, l'installation fonctionna deux heures chaque jour, une commission d'experts consignait les résultats techniques, des conférences furent prononcées, la presse technique nationale relatait l'évènement, comme la presse locale :

*«...la foule toujours croissante des curieux mêle ses murmures de surprise et d'admiration au bruissement des électro-aimants et au gazouillement de la cascade artificielle. C'est à grand peine cependant que nombre de spectateurs, peu initiés aux mystères de la science, parviennent à se figurer que tout cet attirail est mis en mouvement par la force invisible amenée des eaux de la Romanche par les deux fils de bronze qui entrent tout bonnement et sans malice par une fenêtre du bâtiment. Et pourtant cela est. »*



La Romanche qui fournissait déjà plus de 2500 ch d'énergie mécanique à la plus importante papeterie de la région, Rioupéroux, deviendra 20 ans plus tard, avec la Maurienne, l'une des deux grandes vallées hydroélectriques des Alpes françaises

Ce succès technique et populaire était un net progrès par rapport aux expériences précédentes. La ligne télégraphique en bronze de 4 mm, soit 167 ohms, transportait une puissance de 7 ch à près de 3000 volts, avec un rendement mécanique global de 62,3 %.

Sur le plan d'époque (k) sont figurés les deux tracés concurrents, celui du projet Bergès d'un canal amenant l'eau de la Rive et celui de la ligne électrique d'essai Deprez de Jarrie à Grenoble. Mais ce projet fut abandonné. Bergès ne comprendra que 15 ans plus tard la supériorité de l'électricité sur l'hydraulique pour le transport de la Force

Comme à Munich, un petit monument conserve à Jarrie la mémoire de l'évènement, non loin du bâtiment de la cimenterie encore existant, une roue d'engrenage des turbines avec une plaque.

Six ans plus tard démarrait dans Belledonne le premier transport industriel de force électrique, système Deprez, de 5 km. La centrale *La Force* alimentait en courant continu à haute tension la première papeterie électrique des Alpes, Chevrant à Domène.

Maintenant, il devenait indispensable de monter en puissance et en distance.

### ***Expériences de Creil***

La *Lumière électrique*, revue très favorable à Deprez, avait depuis 1881 consacré plusieurs longs articles à ses thèses et essais. Il précisait que le transport à distance nécessitait, avec les machines existantes :

1-*L'augmentation de la force électromotrice des machines.*

Sur ce point, tout le monde était d'accord, c'était imposé par les lois de base, les divergences portaient sur les moyens d'y parvenir. Il proposait trois méthodes :

2-*Augmenter la vitesse de rotation, mais on atteignait vite des limites mécaniques.*

3-*Diminuer le diamètre du fil de l'anneau, et augmenter le nombre de spires, mais on se heurtait à des difficultés pratiques et économiques*

4-*Accoupler en tension plusieurs machines. Cette mise « en série » était un expédient dont les inconvénients sautent aux yeux.*

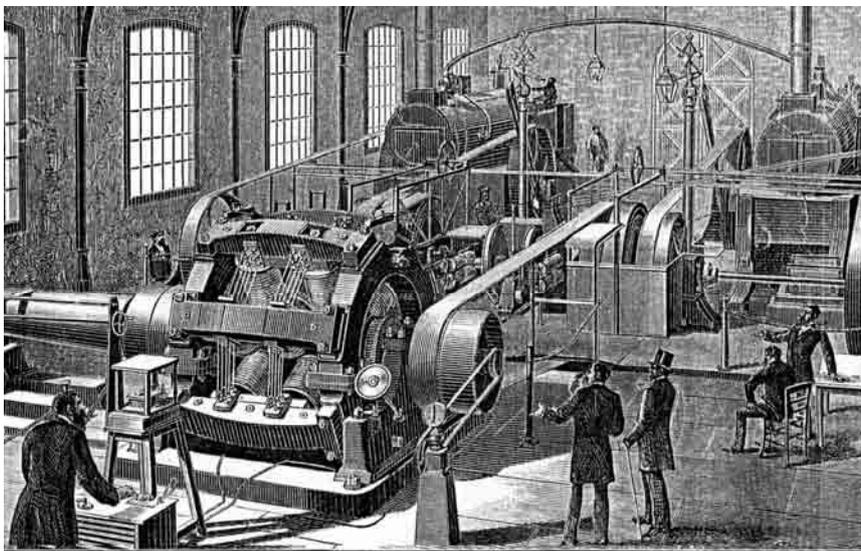
5-*Donc, il fallait faire des machines de grandes dimensions.*

Deprez ne précisait pas qu'il fallait utiliser le courant continu classique, une évidence pour lui et concluait :

*On peut donc poser en principe avec une certitude absolue que l'avenir appartient aux grandes forces électromotrices et aux grandes machines.*

Avec l'aide financière de Rothschild, il entreprit la réalisation de cette grande machine pour une expérience, qui, à une échelle plus importante, permettrait d'obtenir un résultat spectaculaire. Les banquiers confièrent à leurs ingénieurs des Chemins de fer du Nord la charge d'établir un programme détaillé et de suivre son bon déroulement. Ils demandaient au début un transport de 500 ch à 50 km. Depez le ramena à 200 ch avec possibilité de monter à 250/300 ch temporairement. La station de départ sera installée à Creil, avec deux locomotives de 150 ch pour entraîner la génératrice de 200 ch capable de tourner à 200, 300 ou 600 tr/min en débitant 20 A sous 7500 V (n). Une ligne de fil en bronze de 5 mm sera tirée sur 56 km jusqu'aux ateliers de la Chapelle, soit 97 ohms.

La force venant de Creil devra y faire fonctionner 10 à 20 h par jour, pendant plusieurs mois, trois réceptrices entraînant par courroies des machines d'éclairage, des pompes et diverses machines-outils. Le rendement global industriel devrait atteindre au moins 50%.



n Génératrice Depez à Creil

Ce programme fut loin d'être respecté car il y eut plusieurs changements suite à des incidents graves. Tout d'abord, pour des raisons supposées techniques, on réduisit le nombre de réceptrices à la Chapelle à une seule, soit 50 ch. Il fallut deux ans pour commencer les premiers essais, fin 1885.

**Les problèmes :** On remarqua un échauffement très excessif de la génératrice, le noyau magnétique de l'anneau induit était réalisé avec des tôles isolées, serré par des tirants en bronze comme les machines Siemens et Edison, mais l'isolation des tôles et des tirants était mauvais,

entraînant des courants de Foucault. On procéda à la réfection de cet induit en adoptant à la place des tôles, des fils de fer isolés comme dans les machines Gramme.

Puis il fallut exciter les inducteurs des deux machines avec des excitatrices séparées, à la place de leur propre courant, d'où énergie supplémentaire diminuant le rendement.

Le 5 décembre, au cours d'une visite de l'Académie, un vent fort provoqua un contact fugitif entre les deux fils de la ligne qui pourtant étaient isolés sur cette partie avec du chanvre imprégné de résine, le tout dans une gaine de plomb. Ce court-circuit détruisit les induits qui furent refaits pour la deuxième fois, car il n'y avait aucun système pour couper rapidement le courant, très difficile à réaliser en courant continu. Le diamètre des induits fut alors réduit, passant de 1,4 m, initialement prévu, à 0,78 m, et le noyau de fer à nouveau réalisé avec des tôles mais à isolement renforcé et la vitesse de 400 tr/min fut réduite à 200 tours.

Un autre problème sérieux se révéla, l'interruption d'un courant continu, même d'une dizaine d'ampères sous 5 à 6000 volts, s'avérait impossible en séparant les deux pièces métalliques d'un appareil ordinaire ; un arc puissant et dangereux, long d'un mètre, se maintenait sans s'éteindre. Il fallait réduire rapidement l'intensité dans les inducteurs de la génératrice. Depez fit alors réaliser un grand rhéostat, long de plusieurs mètres en fil de maillechort, pour réduire l'intensité progressivement ... *Malgré cela, seulement sous la pression d'une urgente nécessité, lorsqu'on faisait usage de ce malheureux et cependant indispensable appareil, il s'en élevait une couronne de flammes avec des bruits vraiment inquiétants...* (7)

Les essais reprirent en février 1886, mais à puissance réduite. Une commission présidée par Bertrand, secrétaire de l'Académie, procéda enfin à des mesures contrôlées le 24 mai pendant juste une heure. Cinq essais de 10 minutes à des vitesses de la génératrice de 168 à 218 t/min. D'abord à 168 tr/min, la génératrice recevait 66,7 ch des locomotives, produisait un courant de 6,8 A sous une tension de 4690 V ; la réceptrice produisait 27,2 ch, soit un rendement industriel de 40,8%. Au maximum, 218 tr/min, la génératrice recevait 116 ch, produisait 9,85 A sous 6004 V, la réceptrice 52 ch soit 44,8% de rendement.

On était loin du projet initial pour la puissance transportée et surtout le rendement était décevant. Alors qu'en général, celui-ci s'améliore avec une montée en puissance ; de 30% à Munich, il était passé à 47% à la gare du Nord, puis 62 % à Grenoble, et il retombait à Creil à 45%, alors qu'on espérait mieux. Mais où se perdaient donc 55% des chevaux ? entre 35,6 ch dans la génératrice, 7,3 ch seulement dans la ligne de 97 ohms, 21 ch dans la réceptrice. C'étaient donc dans les machines que des échauffements exagérés gaspillaient trop d'énergie. Elles avaient globalement un rendement de 75 %, alors que pour les machines Gramme classiques ce rendement était de 90%.

Le rapport complet, plutôt optimiste, fut rédigé par Maurice Lévy (8). Il ajoutait une estimation du coût : génératrice 50 000 F - réceptrice 30 000 F - ligne de 57 km, 44 800 F. Soit un total de 124.800 F, sans compter les accidents et reconstruction de la génératrice à deux reprises. Le coût global des expériences du Syndicat, financé par Rothschild depuis trois ans, était très élevé, 800 000 F pour les seules expériences de la gare du Nord et de Creil, l'expérience de Grenoble ayant été financée par la municipalité. Ce n'était pas la ruine, car ces banquiers avaient le monopole des mines de cuivre mondiales, et le prix de ce métal, devenu indispensable au développement de l'électricité, avait augmenté de 220 % en un an.

Cette expérience de Creil qui devait consacrer définitivement le système Deprez de transport en courant continu à haute tension était **plus qu'un demi-échec**, entraînant une forte déception, sauf naturellement chez les inconditionnels de Deprez, rangés sous la bannière de la principale revue, *La Lumière électrique*. Le groupe des ingénieurs et scientifiques qui s'opposaient à Deprez depuis l'exposition s'en trouva conforté dans ses critiques.

Le *Bulletin du comité français de la Société internationale d'Electricité* (3/12/1886) note au sujet du rapport officiel de Lévy : *Le programme n'a pas été rempli. La génératrice fonctionnant à Creil n'a réussi à utiliser qu'un peu plus de la moitié de la force mise à sa disposition. Au lieu de recevoir à Paris 100 ch avec un rendement minimum de 50 %, on a obtenu au maximum 52 ch avec un rendement de 45%. ...en résumé, la commission d'examen a procédé, à une expérience, une seule, qui n'a duré guère plus d'une heure...Au point de vue scientifique, le seul point qui mérite d'être signalé dans les expériences de Creil, c'est le transport de courants de très haute tension sans qu'il y ait eu de déperdition sensible par le conducteur isolé et mis sous plomb.*

Le rapport de Lévy souleva aussitôt des critiques sévères de la part de spécialistes qui étaient déjà intervenus sur le sujet au Congrès de 1881, parmi eux Fontaine, Cabanellas et Boistel. La référence technique en la matière, Gramme, homme solitaire et discret, restait en dehors de toute réunion ou déclaration. Boistel publia le 18 octobre un document de 50 pages : *La vérité sur les expériences de Creil*. La critique était dure mais justifiée. Le lecteur en trouvera quelques extraits (9).

Mais la critique la plus percutante était étayée sur des faits indiscutables, une expérience montée peu après par Hippolyte Fontaine, démontrant que la solution de plusieurs machines en série, rejetée par Deprez, était la seule adaptée au transport en haute tension continu.

### La contre expérience de transport à haute tension par Fontaine

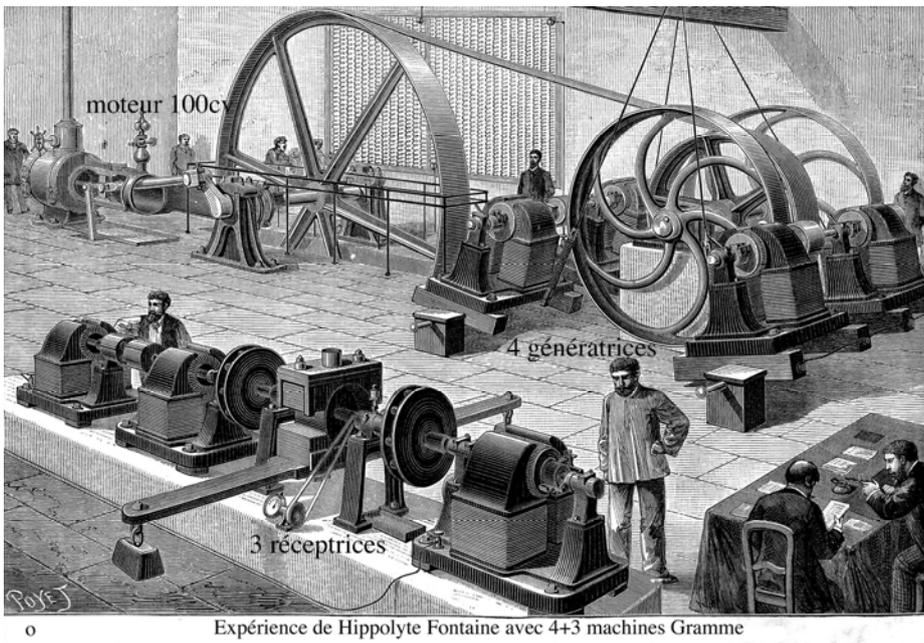
Au-delà d'un certain orgueil, un peu méprisant pour ses collègues compétents, Deprez avait fait deux erreurs :

– Réaliser seul une nouvelle machine puissante à haute tension, sans faire appel aux compétences confirmées, en particulier Gramme-Fontaine, créateurs de la dynamo industrielle. Malgré une bonne compétence en électricité, il n'avait qu'approché l'électromagnétisme complexe des machines, le résultat l'a confirmé (10).

– Il lançait des affirmations techniques étonnantes, non vérifiées, ce qu'on appelle aujourd'hui l'effet d'annonce. Ainsi, il avait édicté : *On peut donc poser en principe avec une certitude absolue que l'avenir appartient aux grandes forces électromotrices et aux grandes machines.* Si pour les grandes forces électromotrices cela découlait des lois de l'électricité, pour la taille des machines, l'essai de Creil l'a infirmé. Fontaine va prouver l'erreur de la déclaration de Deprez : « *Accoupler en tension plusieurs machines - Cette mise en série était un expédient dont les inconvénients sautent aux yeux.* »

– Ajoutons une troisième erreur, la plus grave évoquée ci-après, démontrer dans *La Lumière électrique*, que la solution du transformateur de courant alternatif, proposée dès 1883 par Gaulard à Londres, n'avait aucun intérêt pour transporter l'électricité au loin. Il aurait pu émettre seulement des doutes dans un débat ouvert, mais ne pas faire de ce média un support totalement opposé au courant alternatif pendant des années de guerre des courants.

La France, jusqu'alors l'un des pays leader dans le développement de l'électricité, fut pratiquement absente au début, sur son sol, de cette incontournable technique nouvelle, l'alternatif.



Expérience de Hippolyte Fontaine avec 4+3 machines Gramme

Fontaine va donc monter en trois mois une expérience de transport, dans le laboratoire de la *Société Électrique*, avec le concours de ses dirigeants MM. Nysten, Dehenne et Chrétien, grâce au prêt de machines ordinaires par la Société Gramme.

On utilisa sept machines identiques, *type supérieur*, modèle récent dans lequel l'induit est à la partie supérieure, d'où son nom, tournant à 1400 tours et générant une force électromotrice maximale de 1600 V

avec un courant de 11 A, sans échauffement anormal pendant 24 h. Quatre machines sont montées en série, constituant l'équivalent d'une génératrice Deprez ; chacune a ses inducteurs alimentés aussi en série. Trois autres, montées en série de la même manière constituent la réceptrice. La ligne de transport est représentée par une résistance de 100 ohms (o).

Les essais ont été exécutés les 19 et 20 octobre en présence de Mascart de l'Institut et Potier, professeur à Polytechnique. Les 4 génératrices recevaient 95,9 ch d'une machine à vapeur et tournaient à 1298 tr/min. Leur tension totale était 5896 volts, donnant un courant de 9,34 A dans la résistance. Les réceptrices tournaient à 1120 tr/min et fournissaient sur le frein de Prony 49,98 ch, ce qui donnait un rendement industriel de 52%.

Chaque machine pesant 1,34 t, le poids total était 9,4 tonnes, et leur coût réel de 16 450 F.

Le 25 octobre 1886, Fontaine envoya une communication à l'Académie sur ces essais. Sur tous les points, **les résultats de son expérience étaient meilleurs que ceux de Deprez** : 52 % de rendement contre 45 % pour une puissance transportée et une tension équivalente — des machines standard contre des machines prototypes — un coût réel de 16 450 F contre 80 000 F estimés — un poids deux fois moindre — un délai de préparation de 3 mois contre plus de deux ans — pas d'accidents. Et surtout, des transports plus lointains nécessitant des tensions plus élevées étaient envisageables en ajoutant des machines en série.

Il était vraiment dommage que Deprez, compétent mais entêté, n'ait pas voulu tenir compte de l'expérience de ses collègues.

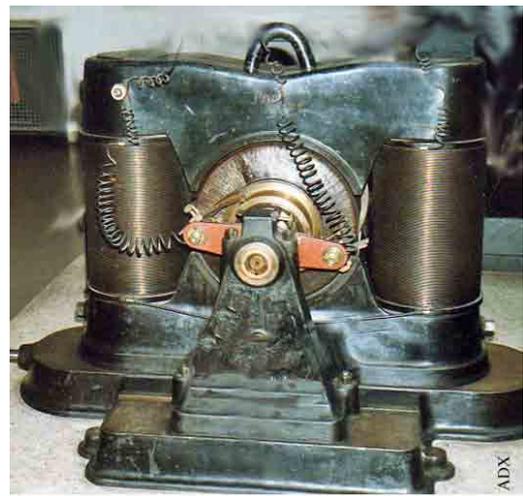
Ainsi, la tension de 6000 volts avec une seule machine courant continu était une butée de tension infranchissable, les rares applications qui ont suivi se sont limitée à 3000 volts. Même aujourd'hui, les grosses machines de traction sont à 1500 V, au plus à 3000 V, en raison de l'isolement difficile du collecteur. La seule solution avec des machines en courant continu était celle de Fontaine, en disposer plusieurs en série.

Le suisse Thury développera 15 ans plus tard, sur ce principe, un transport sur 180 Km à 100 000 volts qui fonctionna 30 ans (IV-4).

#### *Applications de transport en courant continu haute tension*

En se limitant à 3000 V, donc à des distances d'une dizaine de km, la solution Deprez était valable. Quelques installations furent réalisées, avant que le courant alternatif s'impose, dont deux par Deprez, à Bourgneuf et à St Ouen :

– En octobre **1886**, Charles Brown, jeune ingénieur de la société suisse Oerlikon, réalise en Suisse un transport des 30 ch de la petite chute d'eau de **Kriegsteten** jusqu'à Soleure, à 8 Km. Il adopte le système Fontaine, deux dynamos en série, pour la génératrice comme la réceptrice. Chacune débitait 15 A sous 1250 V. L'une de ces machines est conservée à Munich (p). La ligne était en cuivre de 6 mm, soit 9,5 ohms, avec le système 3 fils, ce qui permettait de tourner avec une seule machine. La tension était de 2000 volts et le rendement de 75%, les machines, type Manchester étant d'une très bonne conception. Il résolut la coupure du courant avec un interrupteur spécial capable d'étirer l'arc sur 30 cm. L'installation fonctionna jusqu'en 1908.



P Dynamo Oerlikon 1250 V -1886

– En **1887**, pour éclairer la **ville de Bourgneuf** dans la Creuse avec la chute d'eau des Jarrauds, à 15 Km, on adopta une génératrice type Deprez de 100 ch à 3000 V. La ligne en fil de 5 mm faisait 23 ohms et alimentait à Bourgneuf une réceptrice de moindre puissance qui elle-même entraînait deux machines Breguet de 110V. Le rendement était de 55 %.

– En **1888**, A **Thorenberg** en Suisse, Brown équipe une petite centrale avec deux systèmes de transport d'énergie hydraulique à 6 Km.

1) Une dynamo envoyant 120 ch, sous 1000 V courant continu, à une réceptrice faisant tourner des grosses machines à Lucerne.

2) Deux génératrices Ganz de courant alternatif, sous 1800 V et 40 A, pour l'éclairage de la ville. La tension était rabaisée à 110 V par 7 transformateurs Zipernowsky. Elles éclairaient 3500 lampes Swan de 10 bougies.

Cette installation était significative des avantages de chaque système : Le courant continu haute tension transporte de l'énergie mécanique avec deux machines, ce dont l'alternatif n'était pas capable car le moteur n'apparaîtra que trois ans plus tard. L'alternatif par contre ne nécessite pour l'éclairage

qu'une machine génératrice ; à l'arrivée de simples transformateurs ramènent la tension à 110 V. En continu, il faudrait 3 machines comme dans l'exemple de Bourgneuf.

– En **1889**, le papetier **Chevrant à Domène** en Dauphiné fit équiper la première *papeterie électrique*, fonctionnant à l'électricité, par l'installateur parisien **Hillairet**. L'énergie hydraulique d'une turbine de 300 ch sur le Domènon était transportée par une ligne de 5 km sous 2850 V, depuis la centrale de *La Force* à Revel jusqu'à Domène, où l'on recevait 200 ch, soit 66% de rendement. Ce fut la première centrale de force des Alpes françaises, utilisant la Houille blanche pour faire fonctionner une usine.

Une maquette en relief de l'installation fut présentée à l'exposition de Chicago en 1893.

– En **1889**, l'un des 4 premiers secteurs pour **l'éclairage de Paris** fut attribué à la *Société anonyme de force et d'électricité* dont le capital était détenu par Rothschild. Le **système Deprez** fut naturellement adopté. La centrale installée à St Ouen était approvisionnée en charbon par la ligne des Chemins de fer du Nord. Huit dynamos 2400 V fournissaient chacune 72 kW jusqu'à 6 km dans Paris, à quatre sous-stations où la tension était convertie en 110 v par 2 dynamos, l'une à haute tension faisant tourner l'autre à 110 V.

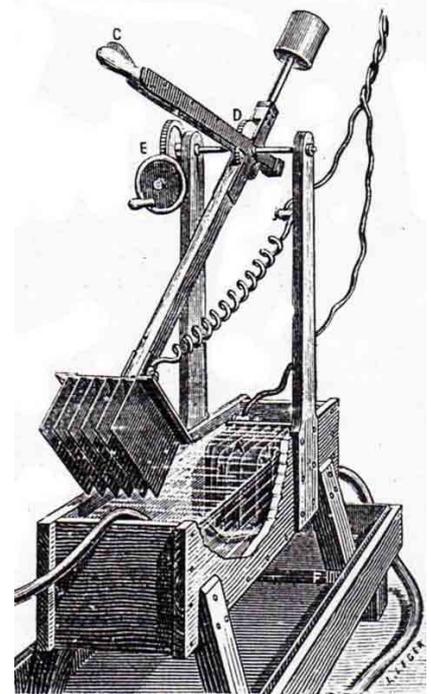
Pour cette installation, Deprez résolut le problème de la coupure du courant sous 2400 V découvert à Creil. Il adopta comme expédient la réduction progressive de l'intensité par un volumineux rhéostat à eau, d'abord à une lame (p2), puis à deux lames.

S'ajoutant au problème du collecteur limité à quelques milliers de volts, le problème de la coupure du courant est l'autre raison qui limite encore aujourd'hui l'utilisation du courant continu au-delà de 3000 volts, 6000 V restant une butée pratiquement infranchissable.

### **Marcel Deprez après 1890**

La direction de la *Société de force et d'électricité* qui éclaira un secteur parisien fut confiée comme prévu à Deprez, mais il ne s'entendait pas avec certains administrateurs et la quitta. Rothschild lui proposa alors un laboratoire à sa disposition et un traitement de 25000 F qu'il refusa, préférant la chaire d'électricité industrielle que venait de créer le ministre du Commerce et de l'Industrie au Conservatoire des Arts et Métiers.

Il resta donc professeur pendant 15 années, faisant encore quelques travaux théoriques, puisqu'une vive controverse l'opposa à nouveau en 1896 à d'autres collègues, en particulier à Potier, sur sa nouvelle théorie qui renversait les lois de l'induction. Son enseignement était nécessairement étoffé par l'étude des courants alternatifs et des transformateurs, à l'inverse des thèses qu'il avait soutenues sur leur inutilité. Ce reniement a dû être difficile. Pourtant Deprez était un électricien compétent. Il fit plusieurs travaux intéressants dont la création d'un galvanomètre, le Deprez-d'Arsonval, resté longtemps célèbre dans les laboratoires.



Rhéostat à eau.

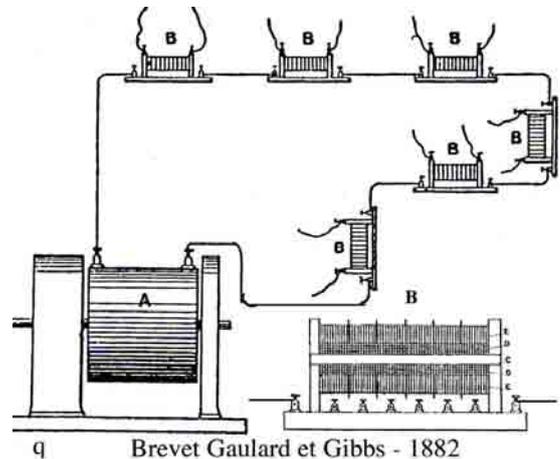
### **Gaulard, la redécouverte du courant alternatif avec le transformateur**

Comme relaté précédemment (II-3), le premier courant alternatif avait été créé naturellement par la machine de Pixii (1832), redécouvert pour éclairer les lampes à arc des phares avec la machine de l'Alliance (1860), puis à nouveau pour les bougies Jablochhoff (1876). C'était l'un des phénomènes électriques marginaux qu'aucun théoricien n'avait encore songé à étudier. On en savait juste assez pour éclairer les lampes à arc et mesurer approximativement un courant « moyen » avec des *électrodynamomètres*. Le traditionnel galvanomètre indiquait une mesure proportionnelle au courant, mais l'électrodynamomètre inventé par Weber vers 1840, donnait une valeur proportionnelle au carré de ce courant, donc représentative d'un courant alternatif équivalent à un courant continu.

C'était suffisant, car tout le monde savait bien que *cette forme anormale de courant, une curiosité*, ne pouvait avoir grand intérêt.

Un jeune chimiste français, travaillant dans la tannerie puis les explosifs, Lucien Gaulard ne le savait pas, ou plutôt voulait l'ignorer, appliquant l'adage connu dans les centres de recherche, au sujet d'une expérience ou invention : *Tout le monde sait que c'est impossible, arrive un étranger qui l'ignore, ... et fait la découverte.*

Gaulard cherchait au début à améliorer l'éclairage électrique en alternatif, indispensable avec les bougies Jablochkoff. À l'exposition de 1881, il avait présenté un dispositif d'éclairage comprenant une lampe à arc en série avec une lampe à incandescence et une bobine d'induction, ainsi qu'un générateur thermoélectrique. Il redécouvre aussi, après Lord Kelvin, que le courant alternatif se propage plus à la périphérie des conducteurs qu'au centre, d'autant plus que la fréquence était élevée, ce que nous appelons aujourd'hui l'*effet de peau*. Ce n'était donc pas tout à fait un débutant en électricité comme on l'a laissé entendre.



Il séjourna ensuite à Londres et présentait en 1882 un système de distribution d'éclairage par bobines d'induction à l'exposition de l' Aquarium Royal. Cela suscita de l'intérêt ; associé alors à Dixon Gibbs, ils prennent un brevet : *Nouveau système de distribution de l'électricité pour servir à la production de lumière et de force motrice.* (q) Il leur est refusé en Angleterre suite à l'intervention de Charles Bright, personnalité de la Royal Society. La dynamo alternative A alimente en série un long circuit de 50 Km sur lequel on peut disposer tous les 500 m une bobine d'induction B alimentant de l'éclairage par son secondaire induit. L'enroulement primaire D est à l'intérieur, contre le noyau en fils de fer. Le secondaire extérieur est divisé en six circuits mis en série selon les besoins.

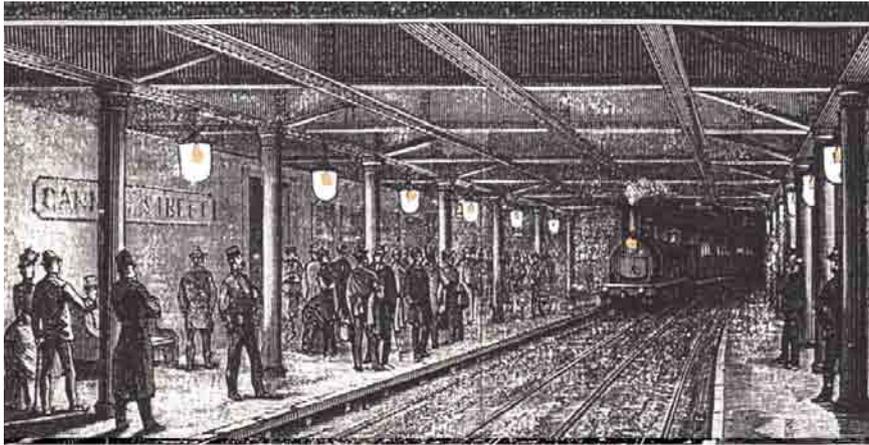
Un nouveau brevet est pris le 12/3/83 apportant quelques modifications, il ne sera pas accepté sur intervention de Ferranti en 1888 (11a).

Heureusement Gaulard ne se découragea pas, bien qu'il ne pouvait encore imaginer le bouleversement qu'allait apporter le courant alternatif avec son transformateur.

### *Éclairage du Metropolitan Railway de Londres -1883*

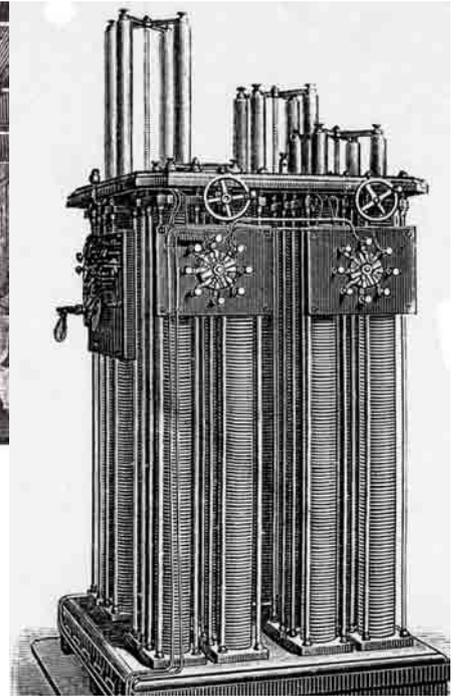
Les deux associés avaient réussi à convaincre les ingénieurs du *Tube* de réaliser une installation d'éclairage dans ce premier métro souterrain, où les lampes à gaz arrivaient difficilement à percer la fumée permanente des 500 passages journaliers de locomotives à vapeur.

Sur une longueur de 25 km, cinq stations furent éclairées. Un moteur à vapeur entraînait la génératrice Siemens de 30 ch à la station de Notting Hill Gate, d'où partait le câble en boucle de 50 km alimentant à chacune des stations un *générateur secondaire.* (s)



s Eclairage électrique du Tube de Londres - 1882

La société créée par Gaulard et Gibbs n'avait pas de moyens de fabrication, cet appareil particulier, type 1 (11b), fut fabriqué par *Woodhouse et Rawson* (t). C'était le regroupement de quatre éléments, comprenant chacun quatre colonnes semblables au modèle des brevets, c'est-à-dire un noyau de fer central ajustable verticalement, un primaire en fil enroulé à l'intérieur, un secondaire concentrique de 6 bobines. Les noyaux de fer, par groupe de 4, étaient relevés plus ou moins à l'aide d'une manivelle ; les 6 bobines secondaires étaient connectées en nombre variable par un commutateur visible sur le côté gauche.



t Transfo Gaulard type 1 -1883

Au total 151 lampes Swan et 5 bougies Jablochhoff étaient éclairés sous une tension ajustable de 50 à 110 volts. Les 5 **générateurs secondaires étaient en série** sur le circuit primaire où circulait un courant constant de 11 A, sous une tension variable jusqu'à 2000 V. Leurs secondaires débitaient aussi en série à courant constant et tension variable de 50 à 100 V. Pour allumer ou éteindre une lampe on ne manœuvrait pas un interrupteur, mais un court-circuit. En cas d'extinction inopinée d'une lampe, elle était automatiquement mise en court-circuit, permettant aux autres de fonctionner.

Le 6 février puis le 5 mars 1884, la S.I.E., *Société Internationale des électriciens*, consacra ses deux réunions parisiennes à la communication de Lucien Gaulard, jeune inventeur inconnu dans le monde des électriciens. Il y expliqua son **générateur secondaire** et les résultats obtenus à Londres. Sa caractéristique étonnante était un **rendement de 89%**, dont doutait Hospitalier dans le compte-rendu du bulletin, l'attribuant à des erreurs de mesures. Il remplaça à cette occasion le nom de générateur secondaire par celui de *transformateur*, le *transfo* des électriciens d'aujourd'hui.

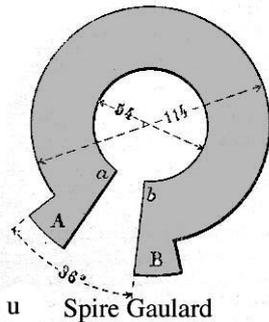
Des mesures ont été dirigées par le professeur Hopkinson, l'un des promoteurs anglais du courant alternatif ; son rapport du 14 mars 1884 mentionne que la puissance produite par la génératrice était de 16 710 W, les lampes en absorbaient 15 018 W, soit un rendement électrique de 89%. L'installation n'était pas une simple expérience, mais établie pour un fonctionnement normal pendant 10 mois, tous les jours de 16h30 à 1h du matin, de novembre 1883 à septembre 84.

Pour ce premier transport en alternatif, c'était un succès.

On imagine la surprise et l'aigreur du clan Deprez à Paris, apprenant que par rapport aux bons résultats récents de l'expérience Deprez à Grenoble, la troisième, cet éclairage du métro de Londres portait sur une puissance 3 fois plus élevée, à une tension équivalente. La distance était presque double et le rendement électrique étonnant. Bien sûr, on avait transporté de l'électricité pour la lumière, mais pas de la Force, puisqu'il n'existait pas encore de moteur pour l'alternatif, personne ne l'ayant encore cherché.

S'ajoutait une certaine vexation qu'un inconnu au sérail scientifique français, supposé sans grande expérience, fasse mieux du premier coup qu'un savant reconnu.

Inévitablement *La Lumière électrique* commença à contester la méthode des mesures d'Hopkinson. Il est vrai



que les mesures sur le courant alternatif étaient aléatoires à la fois par les appareils, comme par les définitions et calculs, on ignorait la valeur efficace, de même le  $\cos\phi$ , donc confusion entre *puissance apparente* en VA, volt-ampère, et *puissance active* en W, watt.

Soucieux de perfectionner son système, Gaulard améliora les deux enroulements de la bobine d'induction en remplaçant le fil par une série de couronnes plates coupées avec deux languettes, l'une pour être soudé à la spire supérieure, l'autre à une spire inférieure (u). L'ensemble des deux enroulements, le primaire inducteur et le secondaire, constituait une imbrication de spires, alternativement primaire et secondaire, l'isolement entre spires étant assuré par un papier verni (v). Cette méthode d'enroulement compliquée avait l'avantage d'assurer un très bon « couplage magnétique », compensant le fait que le circuit magnétique restait ouvert. La mesure du rendement de cet appareil type 2 par Hopkinson donnait 86,1%.

Sur le plan financier, Gaulard avait des difficultés pour ses recherches. Son associé, ou commanditaire anglais Gibbs, dont on ne sait rien, sinon qu'il devait être âgé, est probablement mort à cette époque.

Une opportunité se présenta pour confirmer la validité du système.

#### *L'expérience de l'exposition de Turin - septembre 1884*

À l'occasion de cette première grande exposition italienne était organisé comme à Munich deux ans plus tôt, un concours pour un transport de force électrique, le grand problème du moment, doté d'un prix appréciable. L'Italie, nation récemment unifiée, aspirait à être reconnue comme un grand pays industriel. Gaulard comprit l'intérêt de cette expérience, à laquelle Deprez ne participait pas, trop absorbé par la préparation de Creil.

Le projet qu'il proposa consistait à transporter l'électricité depuis l'exposition de Turin à Veneria, puis jusqu'à la gare de Lanzo, soit 40 km, la ligne à poser longerait le chemin de fer

Mais il n'avait pas de banquier pour l'aider. Pas possible de commander chez Siemens une génératrice, la Banque d'Escompte de Paris lui refusant une avance. Il alla démonter la machine de Londres, ce qui n'arrangea pas le métré. Pour le fil de la ligne, la maison Mouchel de Lyon, qui exposait aussi, lui prêta 80 km de fil de bronze de diamètre 3,7 mm. Le directeur des chemins de fer, Bignani, l'aida beaucoup en acceptant de fixer la ligne sur ses poteaux télégraphiques. Le jour de l'inauguration, le couple royal d'Italie s'arrêta une demi-heure à son stand pour se faire expliquer l'opération et s'engagea à prendre en charge la moitié des dépenses de l'expérience.

La génératrice Siemens à 12 pôles, tournant pour 268 Hz, était installée avec son moteur à vapeur dans l'exposition. Elle fournissait un courant constant de 12 A à tension variable jusqu'à 2000 V, régulé automatiquement par un appareil original à solénoïde et bain de mercure, agissant sur le rhéostat



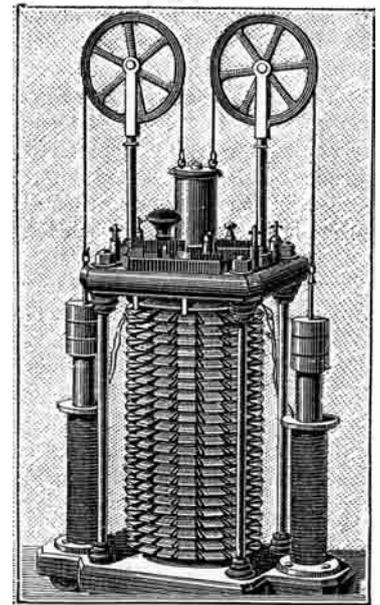
Générateur secondaire Gaulard - Gibbs  
v type 2 - 1883

d'excitation. Les deux fils de sortie formaient une boucle alimentant en série sur 40 Km, 4 groupes de transformateurs, à l'exposition elle-même, à Turin, à la gare de Veneria, puis à celle de Lanzo.

Les transformateurs de type 3 (w) avaient des colonnes semblables au type 2. Leur poids était de 20 kg, la hauteur de 0,61 m et les enroulements primaires et secondaires avaient chacun 455 spires en forme de disques. Ils alimentaient 15 lampes de 16 bougies, soit près d'un kW avec un rendement individuel de 89% (avec un courant de fréquence favorable, à 268 Hz). La régulation par le noyau de fer, pour maintenir le courant secondaire constant, se faisait automatiquement par deux électro-aimants. La puissance s'ajustait ainsi en fonction du nombre variable de lampes en service.

Sur l'ensemble des sites, il y avait 128 lampes à incandescence et 14 lampes à arc fonctionnant 5 heures le soir (12). La puissance totale transportée était environ 20 kW, soit 27 ch.

L'installation fut très difficile, semée de péripéties, Gaulard n'ayant qu'une ou deux personnes avec lui pour tout installer. Par malheur, une épidémie de choléra sévissait à Turin et les mesures de quarantaine rendaient les voyages et les transports compliqués. Le 25 septembre, les premiers essais se sont bien déroulés, contrôlés par le professeur Galileo Ferraris. Le dimanche 28 on annonce à Gaulard que le jury du Congrès devant se séparer le 30, aurait lieu le 29 au soir à Lanzo le dîner de clôture, à l'éclairage électrique, comprenant le jury et 300 personnes. À Turin, les machines devaient être mis en service à 7 h 30 du soir précises. Une série de contretemps et d'informations mal transmises par le télégraphe ont failli faire tourner l'essai à la catastrophe.



w Transfo Gaulard type 3 - 1884

Gaulard écrit : *...quelques chandelles éclairent un peu la salle du banquet, j'attends montre en main 7h30. À 7h35, rien, 40,45, rien, je commence à désespérer ; toutes les idées me passent par la tête : un contact a pu se produire sur la ligne, un fil coupé, car je dois me méfier des malveillances. Comme je sens qu'il me sera impossible de recommencer le lendemain, puisque le jury doit partir, et que j'entends déjà les rires et les plaisanteries au-dessus de ma tête, je me sens devenir fou. (prémonition ?). Enfin à 8 h moins 5, j'aperçois tout à coup l'électrodynamomètre qui se met en mouvement, et la lumière jaillit au milieu des applaudissements.* On rapporte que quelques minutes plus tard, désespéré, il se serait jeté sous une locomotive.

Confirmant la réussite du métro de Londres, ce fut une belle avancée technique, même si le système série, valable pour ce transport particulier, s'avèrera inadapté pour une distribution à de multiples usagers. L'alternatif n'était plus cet enfant anormal de Faraday et d'Ampère. Cet outil simple, statique, récepteur de haute tension renvoyant de la basse tension ou l'inverse, qu'il se dénomme bobine d'induction, générateur secondaire ou transformateur pouvait remplacer deux machines tournantes à courant continu, avec un meilleur rendement et un coût bien inférieur.

Le jury décerna à Gaulard un prix de 10 000 liras, ou francs de l'époque, somme appréciable à comparer au prix Volta de 50 000 francs décernés à Gramme. Il fut décoré de la Croix de la Couronne d'Italie, il aurait sans doute préféré la Légion d'honneur française, mais dans son pays, il dérangeait. Tresca, académicien français, membre du Jury fit une très brève note à l'Académie le 6 octobre concluant : *« cette communication se borne d'ailleurs à constater la réussite complète d'une distribution de différents éclairages, sur un parcours de 40 Km...mais il doit être bien compris qu'il ne s'agit pas du transport d'un travail mécanique. »*

Galileo Ferraris envoya le 11 janvier 1885 à l'Académie de Turin un long mémoire sur son calcul du transformateur de Gaulard et ses essais, publié en français dans la Lumière électrique (13). Il y recherche pourquoi ses essais ne concordent pas avec ceux de bons expérimentateurs, Uzel de Sauter Lemonnier, Hopkinson et Gaulard. Les mesures étaient faites avec l'électrodynamomètre pour

l'intensité, l'électromètre à quadrants pour la tension (14), il y ajouta des mesures calorimétriques difficiles mais rigoureuses. Il découvre en particulier que ces différences résultent d'une caractéristique de l'alternatif, banale pour nous ; la puissance mesurée comme le produit de la tension par le courant, puissance *apparente* en VA, est plus élevée que la puissance *active* réelle en watt, qui doit tenir compte du déphasage  $\varphi$  du courant sur la tension, par multiplication avec le  $\cos\varphi$ . Le rendement réel se trouve donc être de 92%.

Cette étude sur le tout nouveau transformateur est importante, c'est la première sur le courant alternatif et elle conduira Ferraris à découvrir indirectement le principe du moteur asynchrone.

En Italie, ce fut l'enthousiasme, fière de se placer ainsi dans cette course internationale au transport de force. À l'étranger également, on réalisa que le courant continu n'était pas la seule voie possible et que ce courant alternatif négligé pouvait résoudre le problème, pour l'éclairage tout au moins, pas encore pour la force mécanique.

En France, ce fut très mitigé, doute ou franchement opposition et dénigrement. Le conflit larvé depuis un an entre Gaulard et *La Lumière électrique*, revue inconditionnelle de Deprez, se transforma en cette **guerre des courants**, continu contre alternatif qui va agiter plusieurs pays, à divers degrés, pendant six années.

L'Italie avec Ferraris se trouva dès le départ dans le camp alternatif, ce qui lui vaudra la découverte du principe du moteur recherché par tous. La France resta cramponnée pendant encore des années au continu, dans le sillage de Deprez. Bien que les deux premiers leaders de ce dilemme technique, Deprez et Gaulard, soient tous deux français, la préférence allait au savant reconnu appartenant au sérail plutôt qu'à l'expatrié inconnu, trublion aux idées originales.

Le premier round de cette guerre ne tarda pas : le professeur italien Colombo envoie à la *Lumière électrique* un article commentant le succès de l'expérience de Turin. La revue obligée de le publier en première page dans son n° 41 du 11/10/1884, propose rapidement à Deprez d'écrire lui-même une réponse contestant ce partisan italien de Gaulard, non pas dans le n° suivant, ni après le texte de Colombo suivant l'usage, mais juste avant, une grave faute d'objectivité éditoriale. Avec pour conclusion : « *Je ferai en outre remarquer que les courants alternatifs ne se prêtent nullement au transport de la force, qu'ils ne sont propres qu'à l'éclairage et enfin qu'ils font naître dans les masses métalliques des courants induits qui entraînent des pertes inévitables.* » Ce dernier point lui avait d'ailleurs causé bien des soucis dans sa machine de Creil.

Pendant plusieurs années, la revue publiera des dizaines d'articles sur le sujet dans le même esprit d'opposition à Gaulard dont les écrits figuraient en petits caractères dans les rubriques pour correspondances ou faits divers, alors que Deprez et le rédacteur Frank Géraldy avaient droit aux premières pages. En effet Gaulard, comme tous les novateurs dérangeants, eut nombre de conflits tant avec des prédécesseurs réclamant leur priorité d'idée, qu'avec les suiveurs, perfectionneurs du transfo et leurs brevets. Son psychisme fragile le supportera mal.

Dans la petite gare de Lanzo, les voyageurs ne remarquent plus une plaque de marbre de Carrare, haute d'un mètre, apposée en 1890 et présentant le portrait de Gaulard et son transformateur type 3 avec l'inscription en italien :

*Ici en l'année 1884, Lucien Gaulard de Paris a vaincu le premier la difficile transmission de l'énergie électrique à grande distance avec le courant alternatif.*

*Sous les auspices de la société électrique de Milan, avec le concours du chemin de fer Lanzo-Turin et ses admirateurs. (x)*



X Gare de Lanzo

### La distribution en série de Gaulard, à intensité constante

La conception du premier système adopté par Gaulard à Londres, distribution en série à intensité constante et transfo à circuit magnétique ouvert, nous surprend aujourd'hui. Ne pas fermer le circuit magnétique n'était pas très pénalisant avec une distribution série au primaire et une fréquence élevée de 133 Hz, cela permettait un équilibrage facile des charges à l'installation. D'ailleurs un Anglais, Swinburne, a étonné, au cours d'un congrès en 1889, en démontrant que le transfo à circuit ouvert pouvait même avoir un meilleur rendement que le circuit fermé, dans certaines conditions, à faible charge.

Le montage série primaire impliquait un montage série des lampes du secondaire ; mais à l'installation, il fallait faire un réglage pour obtenir au secondaire de chaque transfo une tension adaptée au type et nombre de lampes alimentées. Ce réglage était obtenu par l'enfoncement variable de la tige en fer, le noyau magnétique, au centre de la bobine, mais si l'on faisait varier la charge secondaire, il fallait refaire le réglage.

Gaulard étudia ensuite le type 2, où l'imbrication complète des spires primaires et secondaires leur assurait une induction mutuelle maximale et compensait presque totalement la non continuité du circuit magnétique. Ce *sandwichage* était néanmoins compliqué à fabriquer.

Pour l'application du métro de Londres, le choix technique du système série était acceptable, de même pour l'expérience de Turin, d'abord parce que la fréquence très élevée, 268 Hz, améliorait encore les choses (15), ensuite les charges des secondaires étaient constantes, le réglage d'entrefer était fait définitivement à l'installation. Par contre pour une distribution en dérivation à des abonnés comme celles de Grosvenor Gallery à Londres, il faudra retoucher le réglage de leur transfo lorsque les abonnés modifiaient le nombre de lampes en service, complication qui devint inacceptable.

Aussi pour l'installation de Tours, Gaulard comprit qu'il fallait distribuer en dérivation, à tension constante et non plus courant constant. Le transfo à circuit magnétique ouvert et variable n'étant plus nécessaire, un transfo à circuit magnétique fermé, type 4, était plus simple et de meilleur rendement au-dessus de 50% de charge. On l'a alors accusé de copier ce perfectionnement de Zipernowsky, son copieur à l'origine ! (y)

L'adoption au début par Gaulard du système série résulte probablement des recherches qu'il faisait sur l'alimentation des lampes à arc, le plus souvent en série par deux, ou plus chez Brush. Notre habitude des réseaux à tension constante et intensité variable en fonction de la charge ne doit pas nous faire oublier que le transport Thury a fonctionné aussi à intensité constante (IV-4). Un autre type de réseau à intensité constante a été l'alimentation des cuves d'électrolyse pour obtenir l'aluminium. Il fallait le courant continu de dynamos à basse tension, soit des dizaines de milliers d'ampères, traversant en série des dizaines de cuves dont la chute de tension était d'environ 10 V à l'origine, 4V actuellement ; ce qui imposait leur mise en série et un réglage de puissance par l'intensité. Lorsque le continu fut produit par les premiers redresseurs à vapeur de mercure, puis au germanium, le système ne fut plus possible et le réglage se fit par la tension.

De même les harmoniques se propagent naturellement dans nos réseaux sous forme de courants constants à tension variable. Idem dans le transformateur de courant.

Peu fréquent, le système de distribution à intensité constante et tension variable n'est donc pas une étrange singularité.

*Les antériorités*

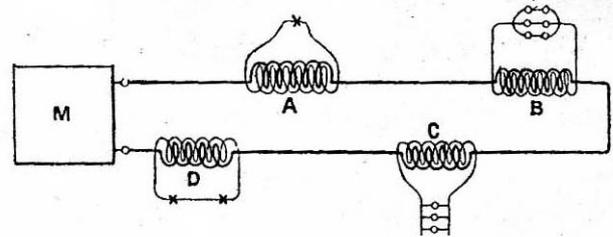
Il était prévisible qu'elles soient nombreuses, aussi bien sur la bobine d'induction utilisée comme transformateur, que sur la distribution avec du courant alternatif.

Citons les plus notables :

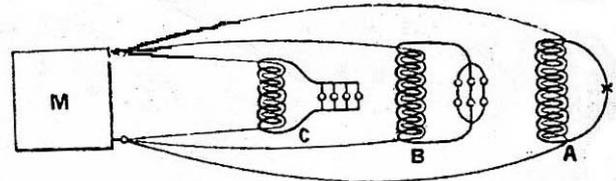
- La plus ancienne était une bobine d'induction à circuit magnétique fermé, construite par l'Anglais Varley, brevetée en 1856, puis celle de Benoist brevetée en France en 1857 (z).

- Jablochhoff avait breveté en 1877 un système d'éclairage avec ses bougies branchées par 1 à 3 en série sur des bobines d'inductance. L'alimentation était en courant continu, mais envisagée en alternatif, en supprimant les interrupteurs-trembleurs et les condensateurs (za). Un autre brevet de 1881 décrivait l'emploi d'une bobine avec deux secondaires sur un circuit en alternatif.

- Charles Bright, président de la section anglaise de la Société Internationale des électriciens, avait breveté en 1878 une distribution avec des bobines d'induction pour l'éclairage en alternatif, mais pas appliqué.



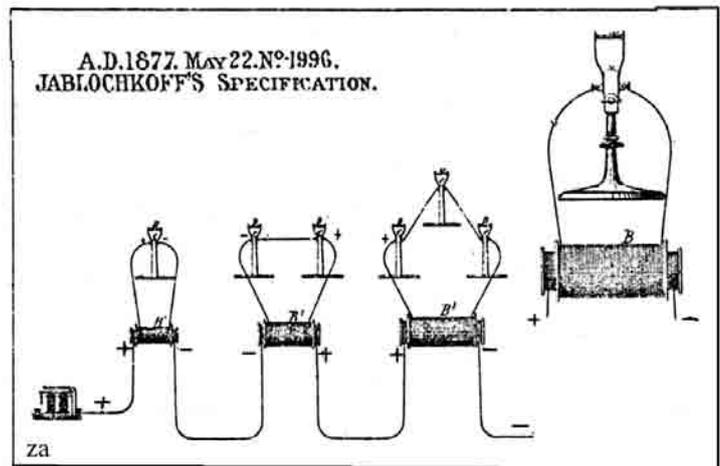
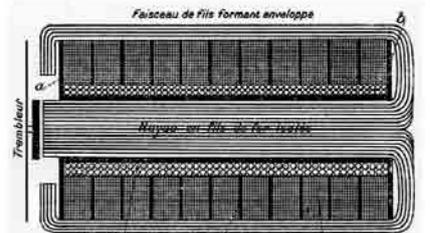
Montage des appareils dans le système Gaulard et Gibbs. I constant ; E variable.



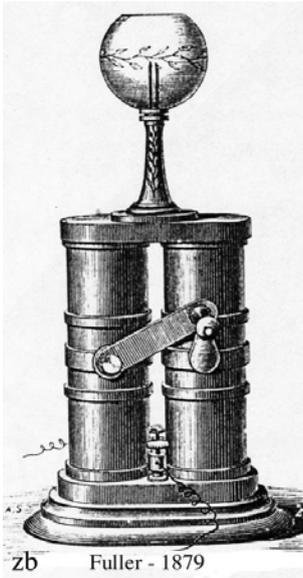
Montage des appareils dans le système Zipernowski, Déri et Bláthy. — E constant ; I variable.



Varley - 1856

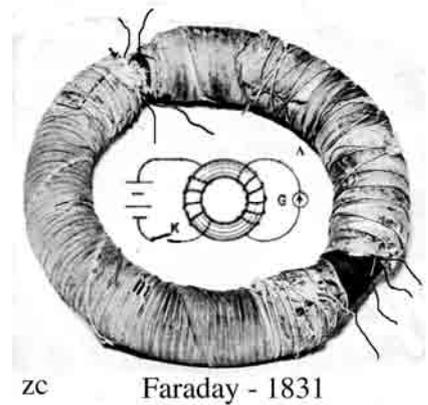


za



– En 1879, l'Américain Fuller réalise une lampe alimentée par un surprenant transfo individuel à circuit magnétique fermé (zb)

– Deprez et Carpentier prennent en 1881 le brevet d'un *système de transport à distance et sa transformation* basée sur la réversibilité de la bobine d'induction, qu'ils ont découvert. Il est donc possible de transformer du courant *en quantité*, en courant *en tension* et l'inverse, évitant ainsi des pertes de transport.



Pourquoi n'ont-ils pas poursuivi en appliquant ce procédé au courant alternatif ?

Pour bien identifier ce que **Gaulard apportait de réellement nouveau**, il faut distinguer deux éléments de nature différente :

1) l'appareil lui-même, réalisé avec ces diverses bobines d'induction, à circuit magnétique fermé ou ouvert. Il est évident que toutes les variantes de deux bobinages couplés par induction, avec plus ou moins de fer, ont été imaginées, depuis la première réalisée en 1831 pour l'une des grandes découvertes du siècle (zc). Faraday peut alors être considéré comme l'inventeur du transformateur, en tant qu'objet physique, sans préjuger de son utilisation.

2) l'utilisation de cet appareil pour modifier tension donc courant en alternatif, pour une application particulière ou dans l'objectif de distribuer l'énergie électrique au loin. La plupart alimentaient l'inducteur, ou primaire, de cette bobine d'induction, ou de Ruhmkorff, avec du courant continu haché par un trembleur, donnant au secondaire un courant oscillant à haute tension. Certains l'ont alimenté en alternatif, signalant sa propriété d'élever ou abaisser la tension, mais aucun n'a envisagé ni réalisé un essai réel pour démontrer que ce procédé résolvait le transport de l'électricité au loin.

Cet exemple typique doit servir à tous les donneurs d'idée ou preneurs de brevets qui s'arrêtent là, sans aller jusqu'au bout, la démonstration par l'expérience que cela peut marcher. C'est plus difficile et demande volonté, ténacité, temps et argent.

La motion de l'Assemblée générale de la Société Internationale des électriciens du 2 avril 1889 concluait sur l'apport de Gaulard :

*« C'est bien à Lucien Gaulard que revient tout l'honneur de l'invention de la distribution de l'énergie électrique à grande distance, par l'emploi des courants alternatifs et des transformateurs. »* Technique universelle aujourd'hui.

Gaulard a été l'homme qui a ouvert une porte vers un riche et immense domaine inexploré, même si c'était avec une clef un peu faussée, la distribution en série. Nombreux sont les électriciens avisés qui ont rapidement investi ce domaine : Zipernowsky de Budapest, Ferraris de Turin, Ferranti de Londres, Haselwander d'Offenburg, Westinghouse de Pittsburg et pour finir avec brio, l'équipe suisse-allemande de Francfort.

En France, le prestige et l'obstination de Deprez et de son entourage ont retardé de plusieurs années pour son pays ce virage incontournable vers l'alternatif.

*Tout scientifique a le droit à l'erreur, mais pas de s'y obstiner quand des résultats d'expérience la démontrent.*

### **Premières installations du système alternatif de Gaulard**

L'**Italie** propose à Gaulard, dès 1884, de réaliser une installation à **Tivoli** à 30 Km de Rome. Là une chute d'eau de la rivière Aniene permet de produire 160 ch pour entraîner les alternateurs et transporter cette puissance à 14 km en haute tension. L'installation donna satisfaction et fonctionna plus de 10 ans.

En **Angleterre**, où fonctionnaient quelques centrales à courant continu, un personnage important, Sir Coutts Lindsay confie en 1883 à Gaulard l'installation d'une centrale à courant alternatif à côté de sa galerie d'art londonienne, **Grosvenor Gallery**.

Deux alternateurs Siemens alimentaient un réseau 2500 V sur 14 km, distribuant à des transformateurs en série pour 3000 lampes et 70 arcs. Mais ce type de distribution en série s'adaptait difficilement à l'augmentation de la puissance des abonnés. Des problèmes survinrent en 1885 et début 1886. Lindsay irrité, embauche comme directeur de la centrale un jeune ingénieur de 21 ans, de Ferranti. Celui-ci va remplacer tous les transformateurs des usagers par des transformateurs en dérivation de sa conception. Ce problème a fait réfléchir Gaulard qui va appliquer ce type de distribution pour une centrale en projet à Tours.

Équiper en **France** des installations de transport à haute tension en alternatif était l'ambition de Gaulard, **la première fut réalisée à Tours**, en 1885, inaugurée en janvier 1886, sous la conduite d'un installateur local dynamique M. Naze.

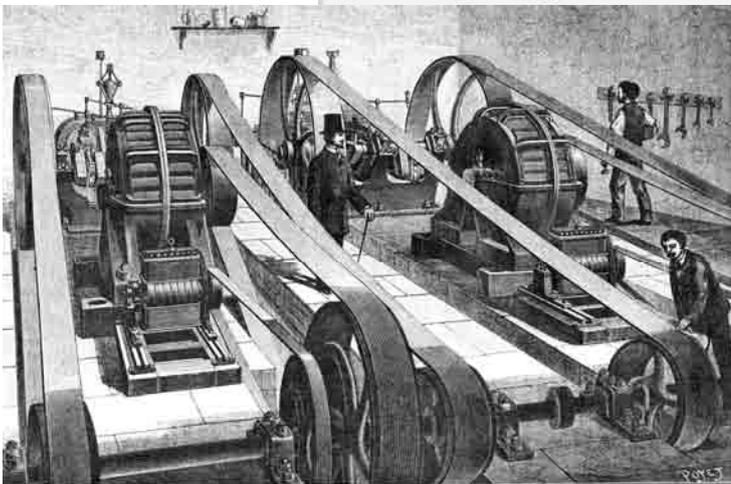
*La Nature* nous en donne le détail : Il est intéressant de comparer la distance qui sépare cette première installation typique de distribution en alternatif avec les nôtres :

Suite aux déboires de Grosvenor Gallery, comme de la récente concurrence du brevet Zipernowsky, Gaulard abandonna le système série pour une distribution à tension constante avec transformateur en dérivation. Il conçoit alors une quatrième version de transformateur en juxtaposant deux appareils du type 2 et remplaçant les culasses magnétiques réglables inutiles par un circuit magnétique fermé traversant les deux colonnes de bobinage (zd).

La centrale, installée sur la place du Palais de Justice, était prévue en deux étapes, suivant la croissance des besoins. Deux machines à vapeur de 100 et 150 ch entraînaient l'une ou les deux génératrices Siemens, avec leur excitatrice à l'avant, visibles sur la gravure (ze). Pour s'adapter à différents niveaux de tension, ces alternateurs avaient 30 bobines induites, couplées en tension (série) ou en quantité (parallèle) donnant 850 V pendant la première étape, pour être porté ensuite à 1250 V. À cette tension, chacun produisait 82,5 kW ou 112 ch électriques. Les 10 groupes de transfos répartis dans la ville, en dérivation sur le câble, consistaient en 2 appareils à 2 colonnes au début, puis 3 ensuite, les 2 ou 3 appareils d'un groupe sont eux-mêmes en série. Les induits, secondaires dans la terminologie actuelle, distribuent en parallèle sous 50 V, tension qui serait peut-être portée à 100 V.



zd Transfo Gaulard type 4 - 1886



ze Centrale de Tours - 1886 - Alternateurs Siemens 100 kw - 2500 V

Sur la gravure (zf) de la salle de commande se distinguent de droite à gauche :

- un petit transfo destiné à alimenter 17 lampes de 50 V en série, faisant office de voltmètre, appareil encore inexistant en version industrielle, l'intensité lumineuse servant d'indicateur.

- un groupe de 2 transfos, soit 4 colonnes, éclairant la centrale et témoin de fonctionnement.

- un électrodynamomètre pour mesurer l'intensité

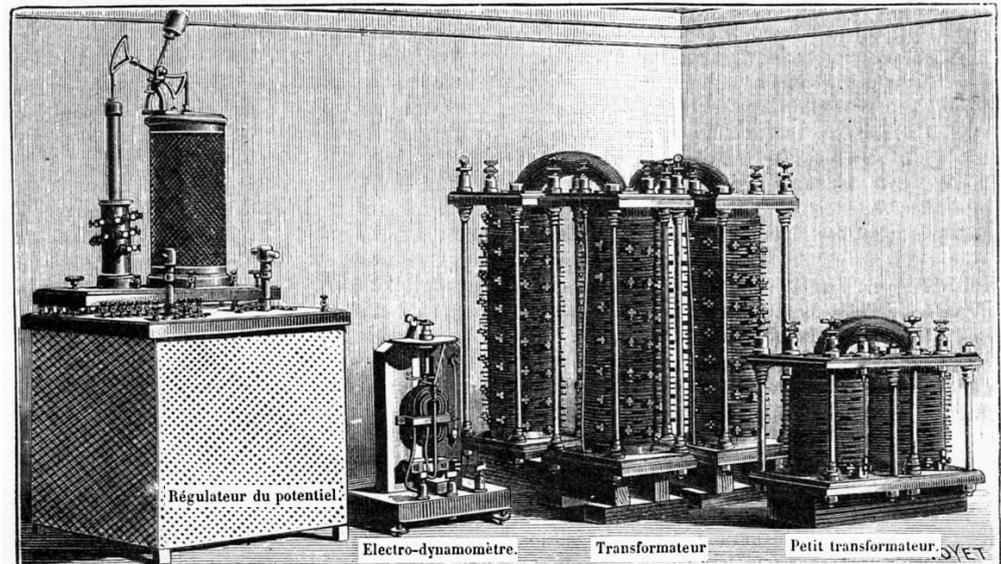
- un régulateur de potentiel essayé à Turin, comportant un fléau dont l'une des branches plonge dans un solénoïde et l'autre dans une cuve de mercure. Il ajuste automatiquement le courant dans les inducteurs de machines.

Après cette première réalisation réussie en France, Gaulard est sollicité pour installer une centrale à Bordeaux et une autre à Poitiers. Ce sont des villes moyennes ayant besoin de réseaux desservant plusieurs km, que les systèmes à courant continu 110 ou 220 volts à 3 fils ne peuvent satisfaire.

On rapporte aussi un grand projet de Gaulard pour l'éclairage de Paris et des boulevards extérieurs par 5 usines extra-muros de 1000 ch chacune, transmettant une partie de leur courant sous 2500 V aux transformateurs, puis à 150 bougies Jablochkoff sur 6 Km. La majeure partie serait transmise dans les arrondissements où des sous-stations les distribueraient sous 100 V à 500 m. Malheureusement, deux ans plus tard, ce fut le découpage de Paris en secteurs indépendants. Une erreur compréhensible à l'époque, où l'interconnexion n'était pas envisagée

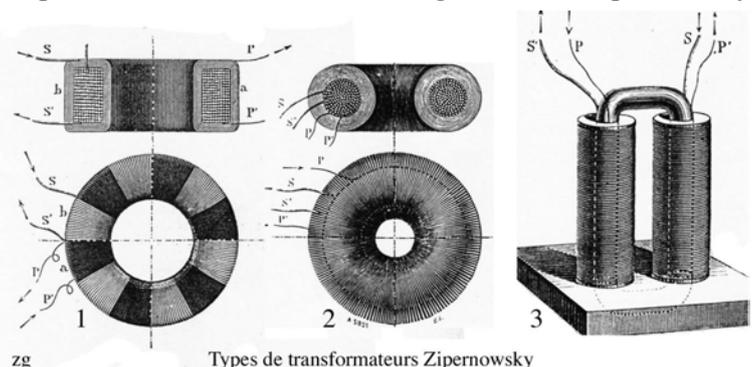
**Gaulard allait pouvoir récolter ce qu'il avait semé.** C'était sans compter sur d'autres problèmes, les brevets et les difficultés financières qui les accompagnent. Son brevet initial de 1881 avait été refusé en Angleterre suite à l'opposition de Charles Bright, celui de 1883, contesté par Ferranti sera déchu en 1888.

À Turin, il avait naïvement expliqué en détail sa réalisation à un Hongrois curieux, Otto Blathy, qu'il ignorait être ingénieur en chef de la Société Ganz de Budapest, important constructeur de machines électriques. A son retour, celui-ci décrit l'expérience de Turin à ses collègues, Carl Zipernowsky, fondateur de la division électrique de Ganz et Max Déri, commercial. Ceux-ci en perçoivent vite tout l'intérêt et prennent dès mars 1885 le brevet d'un système proche, mais amélioré, une distribution avec transformateur en dérivation et à circuit magnétique fermé (zg).



zf

Centrale de Tours - appareils de réglages et transformateurs



zg

Types de transformateurs Zipernowsky



Avec ce brevet, Zipernowsky fait un procès en contrefaçon à Gaulard qu'il a copié, au tribunal de Tours. Un comble ! Il perd son procès fin 1887 mais le gagnera finalement en appel en 1893. Gaulard ne le saura jamais, car son psychisme probablement fragile et émotif ne supporte plus toutes ces difficultés, il devient fou, est interné à Ste Anne à Paris début 1888 où il meurt à la fin de l'année, à 38 ans. Plusieurs électriciens, dont Ferraris envoient à la *Lumière électrique* des nécrologies élogieuses, la revue les publie avec les regrets de circonstance.

Une petite plaque, presque inconnue, sera apposée plus tard par la ville de Paris, sur sa maison natale, au 79 rue *Vieille du temple* (zh). C'est tout ce que la France reconnaissante a dédié à l'un de ses ingénieurs, *les hommes en gris*, qui ont plus apporté au monde que la plupart des écrivains ou politiciens dont les noms émaillent toutes

nos rues.

Déjà à l'époque, l'élite française dite cultivée, l'était beaucoup plus dans la culture littéraire et artistique que dans la culture scientifique et technique, base de l'industrie, prospérité d'une nation.

**En conclusion, Gaulard** n'aura pas vraiment inventé une nouvelle machine, le transformateur, mais découvert et révélé par l'expérience, la potentialité inconnue d'un assemblage particulier d'éléments peu connus. Surtout en luttant contre les ennemis du progrès, le conformisme et la routine, et ensuite les copieurs de mauvaise foi.

Le courant électrique, comme tout fluide naturel, l'eau, l'air, la chaleur, ne pouvait logiquement s'écouler que d'une façon continue, et pourtant...

Jean Cazenobe remarquait : « *Ce courant alternatif ne semblait pas, comme le courant de la pile, sourdre spontanément de l'intimité de la matière ; il était le résultat du mouvement brusque d'un conducteur coupant des lignes de force magnétiques... Toute l'ingéniosité de Gramme avait consisté à trouver un artifice efficace permettant de redresser ces sortes de courants, de les remettre dans le droit chemin, à sens unique.* »

La valeur d'une innovation peut se mesurer au nombre des enthousiastes et celui des détracteurs, mais surtout à ses conséquences, les transformations qu'elle entraîne dans la technique considérée.

À cette aune, la généralisation du courant alternatif fut une grande invention.

La guerre des courants déclenchée en France entre français, se propagea dans d'autres pays, à des degrés variables.

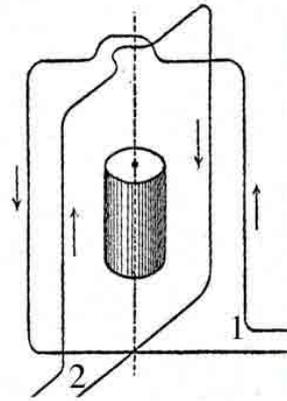
## En Italie

Dans ses recherches et calculs de 1885 pour comprendre le transformateur, **Galiléo Ferraris** constate que la tension alternative aux bornes du secondaire était décalée de  $\pi/2$ , un quart de période, par rapport à celle du primaire. Cette propriété, résultant normalement de la loi de l'induction, le surprend.

En rapprochant les propriétés des ondes sinusoïdales de la lumière d'après Fresnel et les effets du *magnétisme de rotation* d'Arago (I-5), il alimente avec ces deux tensions sinusoïdales synchrones, mais décalées, deux bobines qu'il positionne aussi en angle droit, pensant que le champ magnétique résultant doit aussi provoquer des rotations. Il place au centre de ces bobines un cylindre en cuivre pouvant tourner sur un axe vertical, comme Arago y avait placé un disque. (zj) Le cylindre se met en rotation ; il découvre ainsi ce **champ tournant**, qui induit dans le cylindre un autre courant alternatif, dont le champ s'oppose à celui des bobines, en provoquant la rotation du cylindre.

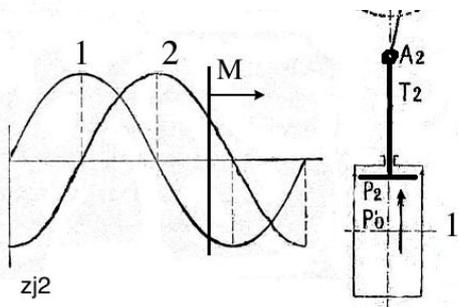


zj Moteur à induction 1 - Ferraris- 1885



zk

Moteur à induction 2 - Ferraris 1885



zj2

Moteur biphasé - Analogie avec pistons

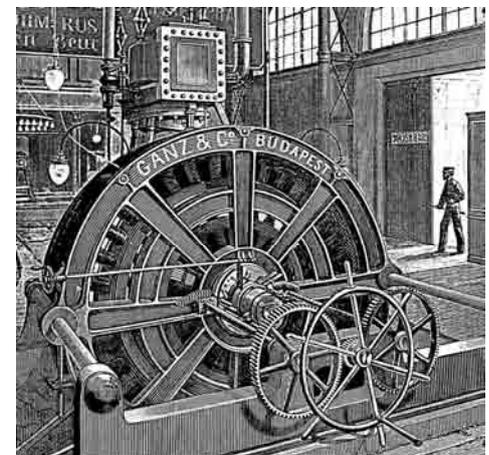
C'était le principe du **moteur à induction**, le moteur idéal en alternatif. Son fonctionnement est analogue au mouvement rotatif obtenu à partir de deux pistons placés à angle droit (zj2). Un autre montage, où l'une des bobines peut pivoter, en modifiant l'angle de 90° avec l'autre, permet de constater la diminution de la rotation (zk). Il ne publie pas ce qu'il pense n'être qu'un phénomène théorique curieux sans application pratique, et laisse dans un placard ses deux maquettes (17).

Il reprend cette recherche en 1886/87 en améliorant ses modèles et donne ses conclusions dans un mémoire du 18 mars 1888 à l'Académie royale des sciences de Turin : Il est possible de construire un moteur industriel sur ce principe, mais son rendement ne pourra pas dépasser 50 % affirme-t-il. Cette barre des 50 % apparaît encore une fois comme une fatalité inéluctable, le Russe Jacobi l'avait déjà fixée à son premier moteur en 1838. Ce n'était qu'une erreur de Ferraris. Comme ses grands prédécesseurs, Volta et autres, Ferraris minimise l'importance de son moteur, « *Il est évident que cet appareil n'a pas d'intérêt industriel comme moteur* ». L'américain Westinghouse ne sera pas de cet avis. Le mémoire considéré comme important par l'Académie fut imprimé et diffusé le 10 avril, en 150 exemplaires aux savants et journaux dans le monde et publié dans *Elettricità*.

Nota : La difficile genèse du moteur asynchrone, nécessitant de plus amples développements, est traité dans le chapitre suivant IV-3.

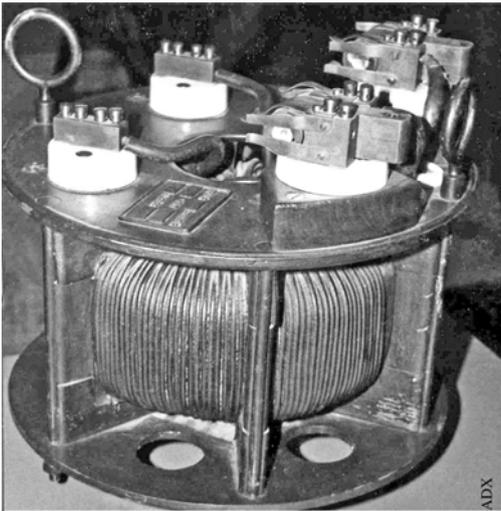
### En Autriche-Hongrie

La firme **Ganz**, fondée en 1878 à Budapest, était la seule importante de l'Empire Austro-Hongrois, elle fabriquait des dynamos et des alternateurs (zl). Les deux brevets, aux noms de **Zipernowsky, Déri et Blathy**, le trio **ZDB** l'un en mars, l'autre en avril 85, leurs donnait l'avantage sur Gaulard, parti au départ sur une distribution série, peu adapté à la plupart des distributions. Ganz va exploiter à fond son avantage en s'implantant dans tous les pays avec un transformateur à culasse magnétique en anneau, simple agrandissement de l'anneau de Faraday (zm) – ignoré par les offices de brevet ?

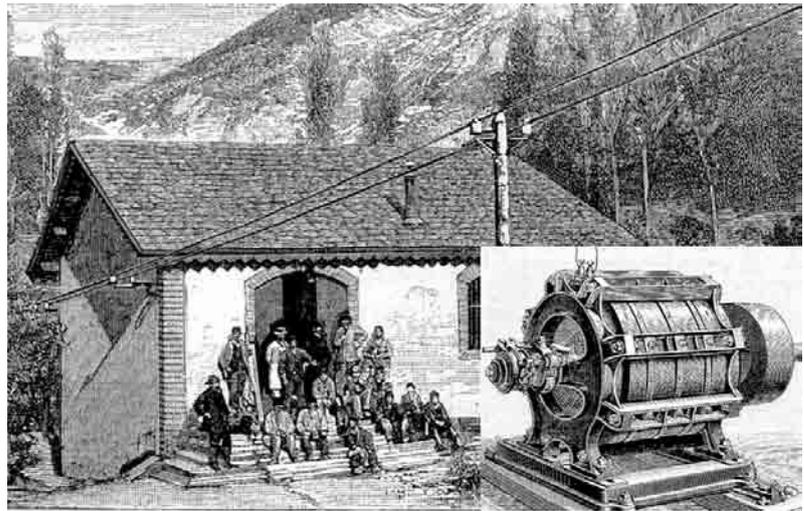


zl

Alternateur Ganz



zm Transformateur Zipernowski 1886



zn Centrale hydraulique de Béconne -1887 - Alternateur Ganz 24 kw-2000 V

Une exposition nationale devait se tenir à Budapest au printemps 1885, elle s'ouvrira le premier mai avec une illumination grandiose de 1067 lampes Edison, alimentées par 75 *transformer*, recevant leur énergie d'une machine Ganz sous 1350 V. L'*Electrical Review* du 8/8/85 en fait un compte-rendu élogieux, aussi Ganz se rend à Londres pour une exposition à la fin de l'année. Mais là sa présentation intéresse fort un jeune inconnu, de Ferranti, qui lui aussi va prendre un brevet d'un *transformer* à peine différent par la forme du circuit magnétique. Il en est ainsi de la chaîne du progrès technique : ZBD reprend en l'améliorant le système de Gaulard et de Ferranti reprend celui des Hongrois en élevant le niveau de tension. Ganz réussit à vendre une licence en Allemagne à Hélios de Berlin, à Schneider du Creusot et la propose à l'Electric Light Edison d'Ivry pour \$ 20 000.

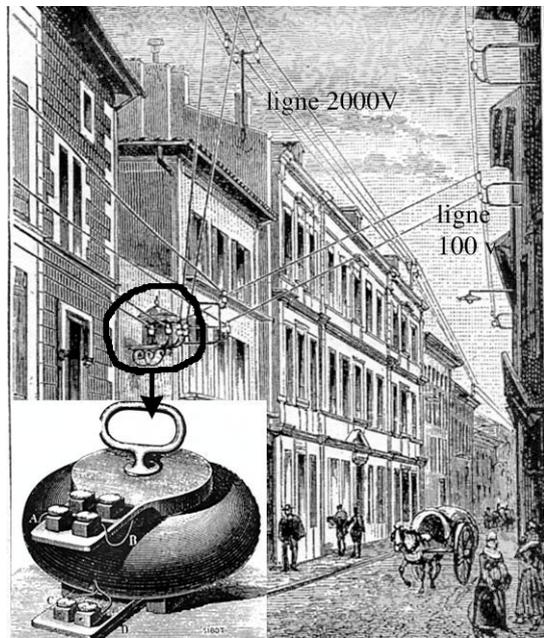
La première installation, en France, de distribution avec le système Ganz, fin 1888, consistait à transmettre l'électricité d'une petite **centrale hydraulique à Béconne** dans la Drôme, pour éclairer deux bourgades, Dieulefit à 5 km et Valréas à 14 km (zn). Une chute d'eau de 25 m sur le *Lez* actionnait deux turbines de 50 ch, couplées à deux alternateurs Ganz de 24 kW à 2000 V, chacun d'eux affecté à une localité. La tension était réglée par un égalisateur compliqué qu'il fallut ensuite modifier.

*La Nature* note : Rien de plus pittoresque et saisissant que le spectacle de cette petite construction perdue au milieu des montagnes, d'où partent des fils presque invisibles portant à des distances considérables l'énergie des forces naturelles inutilisées jusqu'ici. La centrale, existe toujours, elle fonctionna jusqu'en 1990 avec des modifications, typique des centaines de petites centrales d'éclairage construites à cette époque pour éclairer les petites villes sans usine à gaz.

À Dieulefit (zo) la ligne à 2000 V était suspendue au niveau des toitures, les transformateurs accrochés à mi-hauteur par sécurité, desservant les lignes à 100 V, sur lesquelles étaient connectés les particuliers.

L'installation exécutée par une entreprise lyonnaise, Lombard Gerin, utilisait des alternateurs Ganz et des transformateurs construits par Schneider, sous licence ZDB.

D'autres installations suivirent, Nancy, Milan, Rome. En 1889, 1000 transfos auront été vendus, 10 000 en 1899. Ce fut une belle réussite pour Ganz. (18)

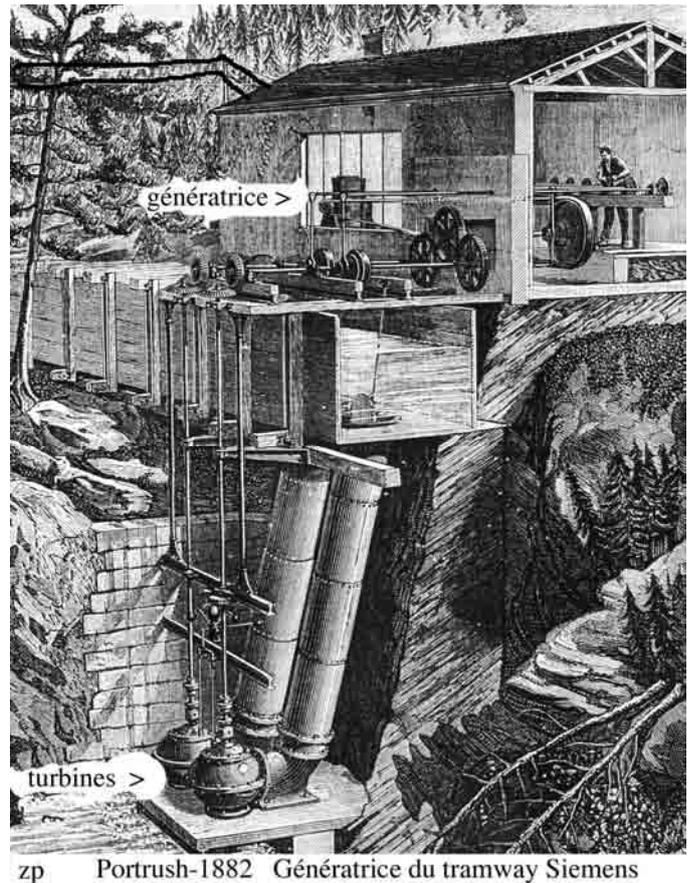


zo Eclairage de Dieulefit par transformateurs

## En Grande-Bretagne

### Le tramway de Portrush en Irlande

Pour faire rouler le premier tramway électrique anglais, en Irlande, Carl Wilhelm, devenu William Siemens, frère de Werner Siemens à Berlin, conçut avec M. Traill à **Portrush** en Ulster, un transport de courant continu d'origine hydraulique, peut-être le premier, en 1882. La centrale hydroélectrique (zp) utilisait une chute de 24 pieds sur la rivière Bush, qui entraînait deux turbines Alcott de 50 HP. Une ligne de 1500 yards amenait l'électricité sous 250 V, à un rail central sur lequel une brosse métallique captait le courant sous la voiture. La ligne de Portrush à Bushmills avait 6 milles de longueur, soit 3 milles de son alimentation à chaque extrémité, ce qui paraît un peu long pour la tension de 250 V, l'automotrice y transportait 20 personnes à 7 km/h. Ce tramway contribua à développer le tourisme naissant, car il emmenait les curieux près des célèbres colonnes de basalte de *Giants Causeway*, la Chaussée des géants.



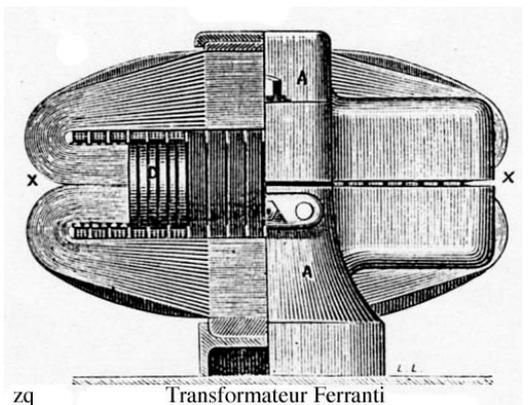
### Londres, la centrale de Deptford

Alors que l'éclairage en courant continu se développait lentement dans les villes, malgré l'opposition des gaziers et les limitations de l'*Electric Act*, l'intérêt pour le transport en alternatif fut plus précoce, puisque c'est à Londres que Gaulard l'avait révélé.

Le jeune et entreprenant ingénieur, Sebastian Ziani **de Ferranti** le comprit vite. Après un début chez Siemens Brothers, il développa avec William Thomson un alternateur plus économique que les dynamos habituelles, puis créa en 1883 une entreprise pour les fabriquer ainsi que des lampes à arcs et autres matériels.

La même année, la centrale de Grosvenor démarrait avec des alternateurs Siemens et le système des transfos Gaulard en série. Au début cela marchait bien ; par la suite les augmentations de puissance des abonnés se heurtaient à des difficultés pratiques, le réglage de l'entrefer variable des transfos qu'il fallait modifier chaque fois qu'un utilisateur branchait plus ou moins de lampes. Lindsay embaucha alors début 1886 Ferranti pour remettre de l'ordre dans la centrale de Grosvenor.

Celui-ci entreprit de tout changer : les transformateurs en série de Gaulard furent remplacés par le modèle Ferranti en dérivation qu'il avait breveté (zq). Gaulard lui fit un procès et le perdit. Les deux alternateurs Siemens aussi furent remplacés par trois machines de Ferranti, plus puissantes, le stator était en deux pièces que l'on écartait pour le montage ou la révision en cas d'incident (zr). Le réseau alimenté par la centrale totalisant 1 650 HP, s'étendait sur 100 milles de rues et pouvait éclairer 28 000 lampes de 10 bougies.

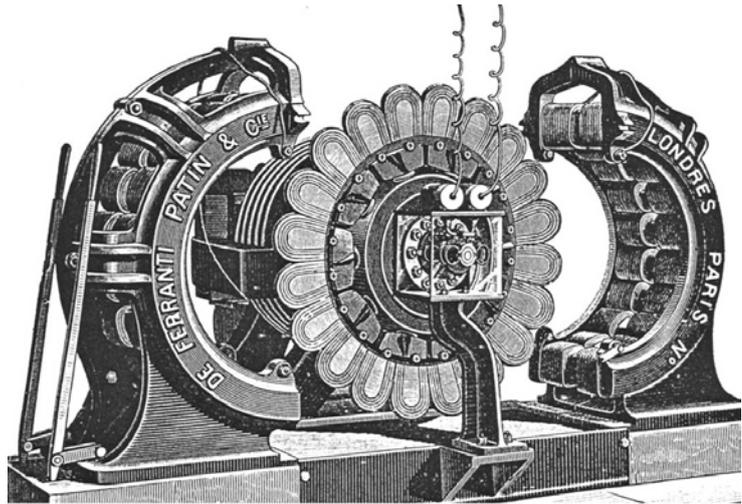


zq

Transformateur Ferranti

Lindsay était très satisfait et Ferranti arriva à lui faire partager ses grandes ambitions sur le développement à venir de l'électricité en alternatif. En août 1887 était créé la *London Electric Supply Corporation limited*, LESCO, au capital de £ 1 million, avec un projet gigantesque, dépassant de loin tout ce qui existait, même en Amérique.

On parlait de deux millions de lampes à terme. Le coût et le risque étaient démesurés, un vrai saut dans l'inconnu. Lindsay rassembla 28 actionnaires principaux, le plus important, Lord Wantage apportait 20% du capital, l'équivalent de £ 7 millions aujourd'hui. L'Angleterre était riche et les investisseurs nombreux.



zr Alternateur Ferranti

Ferranti misait sur un fort développement des besoins en électricité, essentiellement la lumière dans les villes. Pour les satisfaire il fallait une centrale géante, impossible à installer en ville, pour raisons de bruit, de pollution par la fumée, des charrois de charbon à transporter tous les jours. Le courant alternatif était la seule solution permettant d'implanter la centrale en dehors de la ville, à Deptford, distant de 7 milles, au bord de la Tamise, pour faciliter le déchargement des navires charbonniers (zs). L'électricité serait transportée vers Londres à la tension alternative de 10 000 V et abaissée à 2400 V dans quatre sous-station de transformateurs, puis à 100 V. La tension de 2400 V était d'un niveau devenu classique dans les installations en alternatif, mais le saut à 10 000 V était impressionnant.

### Tout était colossal dans ce projet

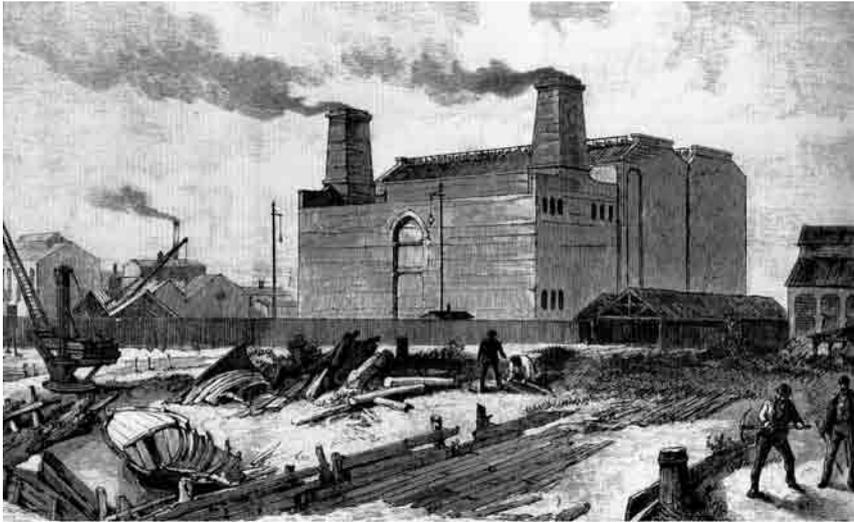
À Deptford étaient prévues 2 très grosses unités de 10 000 HP, soit 7000 kW, puis 3 ou 4 suivant l'accroissement des besoins, ainsi que 3 petites unités avec moteur de 1500 HP et génératrices de 1250 HP pour 25 000 lampes. Par comparaison la grosse dynamo Jumbo d'Edison faisait au plus 120 ch et à l'exposition de 1889, le Suisse Oerlikon présentait la plus puissante dynamo atteignant 500 ch.

Sur la gravure (zt) d'après une photo, la dimension des machines de 1500 HP et ses poulies de liaison contrastent par rapport à la taille humaine. Pour les groupes de 10 000 HP (zu) le diamètre du rotor serait de 46 feets, la transmission par courroies, plus possible à cette puissance est supprimée. Pour entraîner ces générateurs géants, 24 chaudières Babcock et Wilcox fourniraient la vapeur à des moteurs de Hick Hargreaves de Bolton, plus importants que ceux des grands transatlantiques.

Les travaux débutèrent à Deptford en juin 1888, le planning très serré prévoyait de démarrer à puissance réduite fin 1889.

Ces années 1888/89 marquent le vrai démarrage de l'éclairage électrique dans les villes anglaises au détriment du gaz. À Londres, la LESCO n'était donc pas la seule, mais la plus importante compagnie. Des concessions étaient attribuées dans différents districts à 8 compagnies dont 4 utilisaient l'alternatif. Le continu avec batteries d'accumulateurs avait un certain succès, suivant l'avis du constructeur Crompton. Chargées pendant les heures creuses, elles débitaient au moment des pointes, en parallèle avec les dynamos.

Cet avantage du continu sur l'alternatif avait été souligné au congrès I.E.E. de 1888. En Angleterre, la guerre des courants se réduisit à quelques escarmouches entre gentlemen. William Thomson, devenu Lord Kelvin, physicien dont la haute compétence était reconnue, était au début pour le courant continu, Hopkinson pour l'alternatif.

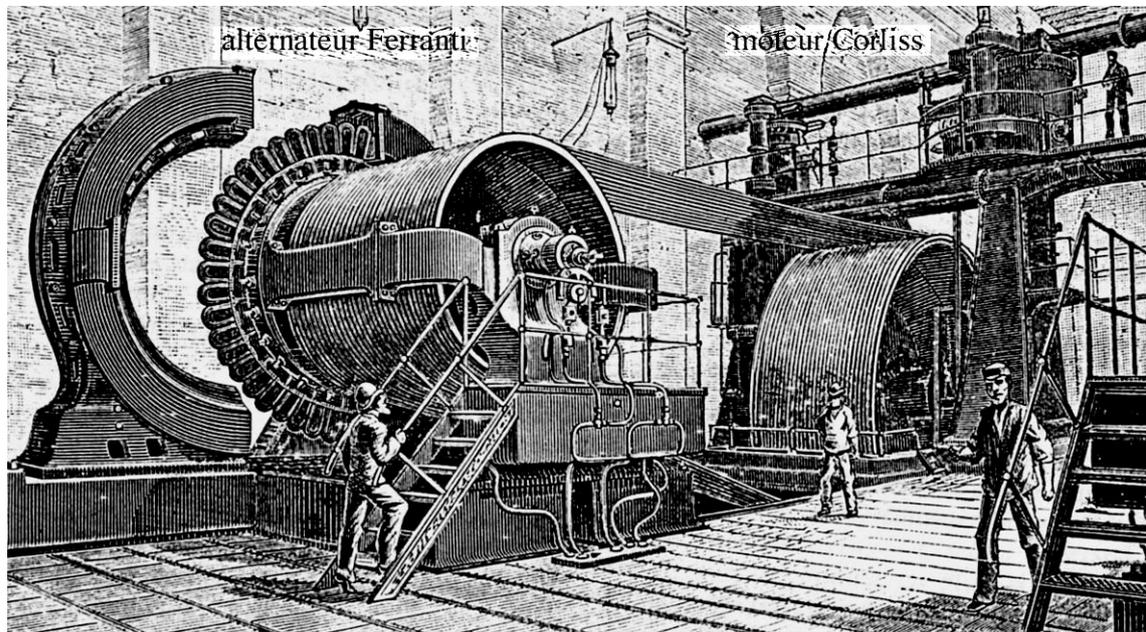


z5

Centrale de Deptford - 1890



zw1 Sir Coutts Lindsay



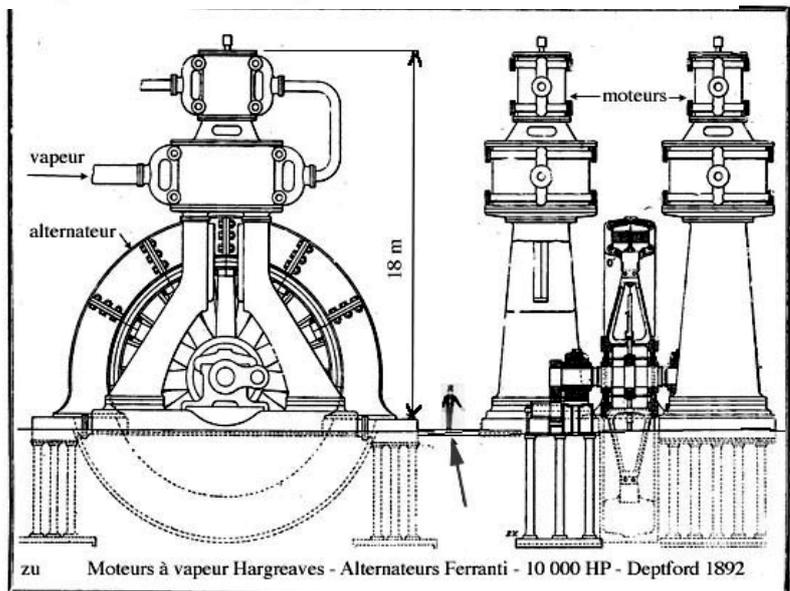
zt

Centrale de Deptford - 1889 Groupe 1500 HP



THE MODERN COLOSSUS  
STEPS FROM THE CROSVENOR GALLERY TO DEPTFORD

zw2 Sebastian Ziani de Ferranti



zu Moteurs à vapeur Hargreaves - Alternateurs Ferranti - 10 000 HP - Deptford 1892

### Couplage des génératrices en parallèle

L'électricité n'ayant pratiquement qu'un seul usage, l'éclairage, la consommation dans la journée était très faible et montait de 8 à 10 fois le soir, d'où une très mauvaise rentabilité des machines, dont la puissance correspondait à la charge maximale en soirée et tournaient à charge réduite le reste du temps.

Une solution aurait été de fractionner la puissance totale, répartie sur plusieurs groupes moteurs-générateurs débitant en parallèle sur le réseau, suivant la puissance nécessaire.

Malheureusement, en courant continu les dynamos fonctionnent difficilement en parallèle, la répartition de la charge également sur chacune est très délicate à régler. Face à cet inconvénient, les batteries d'accumulateurs chargées dans les creux et débitant en parallèle avec les dynamos au moment des pointes paraissaient alors une solution satisfaisante.

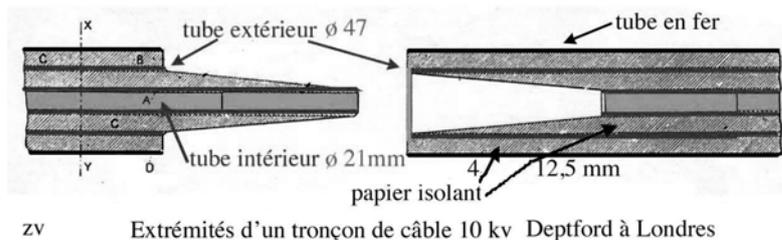
Par contre, les dynamos se couplent très bien en série, additionnant leurs tensions, avantage exploité par les systèmes Fontaine puis Thury.

On découvrit qu'en alternatif c'était l'inverse.

Le couplage des alternateurs en série pour monter en tension ne marche pas, ce qui n'est guère gênant, puisqu'il est facile de monter la tension avec des transformateurs statiques.

Par contre le couplage en parallèle des alternateurs est pratique. Au démarrage, il suffit de synchroniser l'instant du couplage quand ils sont exactement en phase. Sans cet avantage capital, l'interconnexion des réseaux ne serait pas envisageable. Sur le réseau européen actuel, interconnecté, plusieurs milliers d'alternateurs débitent en parallèle au synchronisme, soit exactement à la même vitesse. Le ralentissement d'un groupe surchargé étant mesuré par un léger écart de fréquence.

Le transport de cette énergie à Londres sous cette « énorme pression de 10 000 volts », nécessita des câbles originaux, constitués de deux tubes de cuivre coaxiaux de 177 mm<sup>2</sup> de section et isolés par 12,5 mm de papier imprégné d'huile, de soufre et de paraffine. La résistance totale des deux tubes était de 0,2 ohm/km et le tube extérieur protégé par un tube en acier. Les tronçons de ce câble étaient longs de 20 feet, soit 6 mètres, assemblés sans soudure par emboîtement (zv).



La pose enterrée du câble spécial à 10 000 volts souleva des problèmes d'autorisation et des craintes sur cette tension très dangereuse. On redoutait les conséquences d'une rupture ou d'une perforation. Pour calmer les esprits, Ferranti fit exécuter à Deptford devant des experts un essai réel de rupture de câble sous tension ; le fusible de protection intervint très rapidement pour couper l'arc. Même à cette tension, on peut couper un fort courant en alternatif. Cette découverte est après le transformateur le second avantage incontestable sur le continu.

Un étrange phénomène se produisit au cours des essais du câble. En le connectant à Deptford sous 8500 V, on mesurait sur l'autre extrémité, en circuit ouvert, une tension de 10 000 V. D'abord attribué à une erreur de mesure, il fallut se rendre à l'évidence, ce n'en était pas une, mais un phénomène inconnu dont les physiciens trouvèrent la raison par le calcul. C'était la forte capacité de ce câble coaxial, 0,2 microfarad par km entre les deux conducteurs, et 10 fois plus entre le conducteur extérieur et le tube en acier de protection. Aujourd'hui, tout électricien de réseaux connaît bien cette anomalie, sous le nom d'*effet Ferranti*, mais ignore simplement que ce découvreur n'était pas italien mais anglais.

Après des problèmes d'ordre concurrentiel avec le Board of Trade, la mise en service débuta d'abord à la tension réduite de 5000 V le 7 novembre 1889, par la connexion entre Deptford et les quatre sous-stations de transformateurs - abaisseurs ramenant la tension à 2400 V, de Grosvenor Gallery. Cette sous-station arrivait difficilement à alimenter 33 000 lampes et un premier transfor-mateur, branché sur Deptford, y fut installé.

Ce fut **un triomphe**, tous les détracteurs et les doutes disparurent. Peu après, les habitants autour de Grosvenor qui se plaignaient depuis longtemps du bruit et des trépidations des machines exigèrent leur arrêt, envisagé seulement plus tard, quand Deptford aurait augmenté sa puissance. L'hiver suivant, Londres subit une forte *pea-soup fogs*, aggravée par la multiplication des autres centrales à charbon en pleine ville.

Un an après, le 15 novembre 1890, le succès se transforma brutalement en **catastrophe**. Un opérateur de Grosvenor ouvre les contacts d'un interrupteur secondaire, un arc s'y amorce et au lieu de le refermer, il l'ouvre encore plus, l'arc monte, il se panique et ne pense pas à couper l'interrupteur général contrôlant l'arrivée du câble de Deptford. L'arc enflamme le goudron des supports de câbles fixés au plafond et la station brûle en une demi-heure. C'est le black-out total. On arrive à réparer en urgence un transformateur, quelques jours après il retombe en panne, sa charge se reporte alors sur les autres qui ne la supportent pas longtemps et grillent aussi.

À la suite de cet accident, de Ferranti conçut des disjoncteurs dans l'huile. L'importance de l'appareillage électrique de protection contre les défauts dans les réseaux ne se révéla que lentement avec leur montée en puissance. Ce sera le matériel le plus long à mettre finalement bien au point, seulement dans la deuxième partie du XX<sup>e</sup> siècle (27).

Pendant 3 mois, l'alimentation de 38 000 lampes est coupée et lors de la reprise du service en février 91, il n'y a plus que 9000 à desservir. La majorité des clients avaient repris leurs becs de gaz et ne reviendront que lentement à l'électricité. En août, deux nouveaux moteurs de 700 HP sont installés à Deptford pour y faire tourner les deux machines réparées de Grosvenor, bien que Ferranti affirme pouvoir mettre en service en quelques mois l'un des groupes géants de 10 000 HP. Ils étaient en cours de construction à Deptford même, compte tenu de leur poids et dimensions énormes, les rendant intransportables.

Survint alors un désaccord sérieux entre les actionnaires de la LESCO et Ferranti. Celui-ci quitte la compagnie, la durée de son contrat étant terminée, dit-on. Il retourne diriger son entreprise de matériels électriques, encore active aujourd'hui.

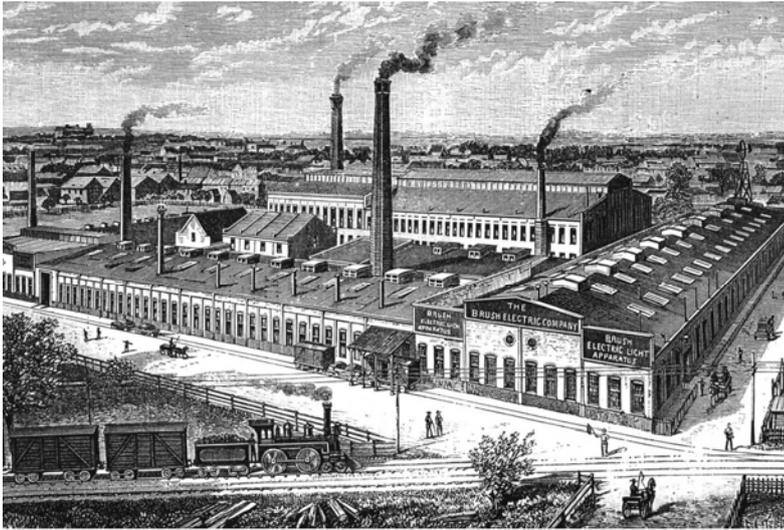
Après une période commercialement difficile, la LESCO reprend une croissance rapide, avec des problèmes techniques limités aux moteurs à vapeurs et chaudières. Elle restera longtemps la principale société d'électricité de Londres jusqu'à sa nationalisation en 1948.

L'audace de Ferranti sur le gigantisme des machines et sur la tension alternative de 10 000 volts en monophasé ont été un pari gagné. Les défaillances survenues se situaient sur les matériels auxiliaires de manœuvre et de protection.

Un grand pas était franchi, ce qui donna confiance aux électriciens pour les évolutions en gestation aux États-Unis et en Allemagne

## Aux États-Unis

L'élan donné à l'éclairage électrique par l'exposition de 1881 s'était concrétisé en Amérique par une rapide multiplication des centrales urbaines. En 1886 la société - mère Edison et ses filiales totalisaient 58 centrales, alimentant 150 000 lampes avec une distribution courant continu 110 V à 2 fils ou 2 x110 V à 3 fils. Elles n'avaient pas le monopole total sur la lampe à incandescence, malgré les brevets ; d'autres compagnies, Weston et Maxim de New York ainsi que Thomson Houston de Boston installaient des lampes à incandescence et à arc en alternatif.



zx Usine de la Compagnie Brush à Cleveland

Brush, fabricant déjà remarqué à l'exposition par ses lampes à arc en haute tension, 800 à 2000 V pour l'éclairage des rues, faisait travailler une usine de 500 personnes à Cleveland (zx).

Il faut imaginer l'ambiance du développement industriel aux États-Unis à l'époque, un amalgame de progrès techniques, d'excitation, de luttes financières, campagnes de presse, qui par ses outrances mêmes témoignaient de la vitalité d'un peuple jeune, construisant un nouveau monde. Simultanément, il écrasait ses millions

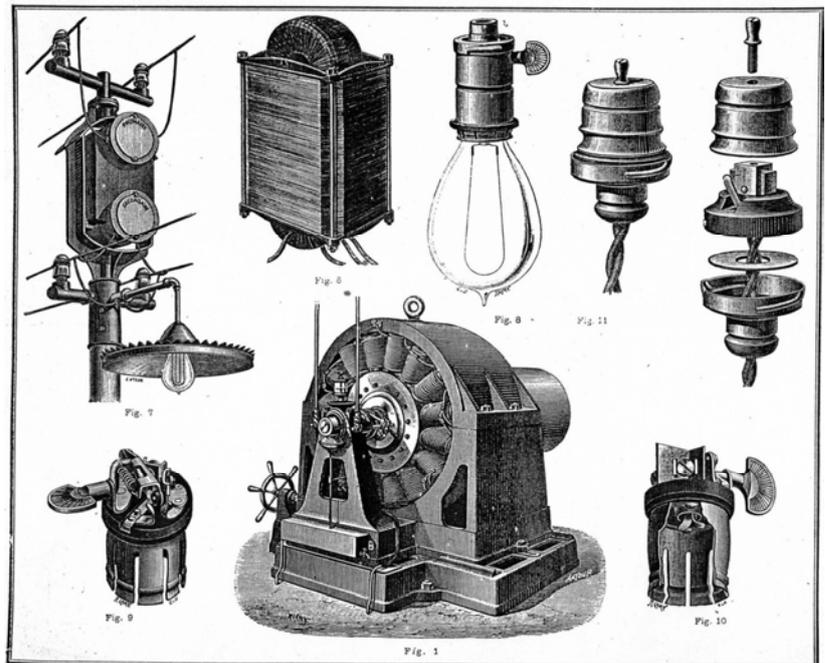
d'habitants primitifs et leur rustique civilisation millénaire.

Encore une fois, l'action des hommes oscille entre le meilleur et le pire.

### *Westinghouse s'engage sur le courant alternatif*

George Westinghouse, industriel en mécanique, s'intéressa en 1885 à l'électricité. Sa compagnie de matériels pour chemin de fer, *Union Switch and Signal Co.*, avait prospéré grâce à son invention du frein à air comprimé, système résolvant enfin l'un des grands problèmes, cause de nombreux accidents avec des centaines de morts.

Il se lança dans l'éclairage électrique avec une génératrice à courant continu et une lampe Sawyer, échappant au brevet Edison par une particularité de fabrication. L'un de ses ingénieurs, Pantaléoni, s'était rendu en Italie pour le décès de son père. Il y rencontra Gaulard et le professeur Ferraris, informa par télégraphe son patron de cette invention d'un transformateur pour le courant alternatif. Plusieurs transformateurs Gaulard, du dernier modèle 4, furent acquis aussitôt, envoyés en Amérique et essayés à Pittsburg. Rapidement le brevet fut acheté, probablement 45 000 francs. Westinghouse fait alors reprendre la conception du transformateur avec un circuit magnétique fermé comme les hongrois de Ganz et Ferranti. Stanley, l'un de ses meilleurs ingénieurs, va préparer une installation de démonstration, à Great Barrington, petite ville du Massachusetts. Dans un moulin, une machine à vapeur entraînait un alternateur Siemens acheté à Londres, débitant 12 A sous 500 V. Les deux fils partaient vers le village à 3 km, raccordés au primaire de 6 transformateurs abaisseurs 500/100 V, chacun pour 25 lampes. L'interrupteur fut fermé le 20 mars 1886, enthousiasmant la presse convoquée et les habitants de cette bourgade, tout surpris d'avoir droit à l'électricité comme les grandes villes.



zz Système de distribution Westinghouse en alternatif - 1887

La *Westinghouse Electric Company* est créée en 1886 pour développer tout un système de distribution électrique en alternatif sous 500 à 2000 V : l'alternateur, dénommé encore dynamo alternative, le transformateur accroché en haut des poteaux, système encore actuel dans nos campagnes, les lampes et accessoires (zz).

L'expansion est rapide, les installations totalisaient 40 000 lampes en 1887, 100 000 en 1888, 200 000 en 1889. La compagnie vendait des centrales situées jusqu'à 3 ou 4 km des utilisateurs, dépassant largement le marché étroit du système à courant continu d'Edison, limité à moins d'un km.

L'un des deux grands de l'industrie électrique américaine s'édifiait rapidement, face à Edison, en perte d'image personnelle auprès des banquiers. Ses entreprises seront bientôt intégrées dans l'autre puissant holding en voie de regroupement, Général Electric Co.

En Amérique, les années 1888 à 1890 furent plus agitées qu'en Europe, et déterminantes dans le domaine de l'électricité-énergie sur les deux problèmes connexes :

- L'amplification de la guerre des courants
- L'apparition d'un moteur en courant alternatif

### *La guerre des courants, alternatif - continu*

Deux grands groupes industriels vont tenter de dominer seuls le marché en expansion de l'électricité, s'opposant radicalement sur un problème technique fondamental, continu ou alternatif, en exploitant chacun l'image médiatique de son génial savant, Edison pour Général Electric, Tesla pour Westinghouse.

En arrière plan, se profilait discrètement le combat financier de deux groupes bancaires.

En Amérique comme en Europe, les électriciens échangeaient, des **avantages et inconvénients** relatifs des deux systèmes, par les revues et les congrès,

Les avantages de l'alternatif résultaient d'abord de la possibilité d'élever ou abaisser facilement et économiquement la tension, avec pour conséquences :

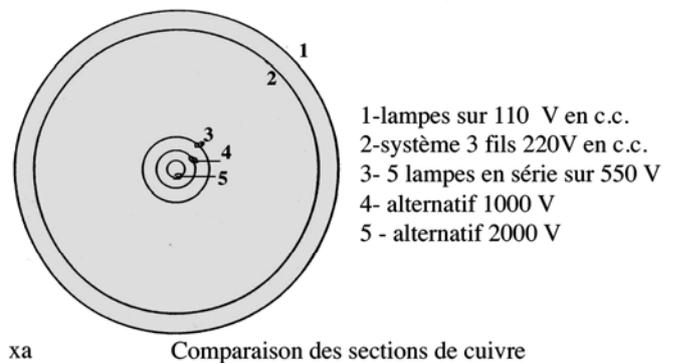
– La centrale n'avait plus besoin d'être au centre de la zone de distribution comme en continu, 500 m à 1 Km, suivant que le système était à 2 ou 3 conducteurs. Une dizaine de km étaient envisageables avec quelques milliers de volts.

– Les pertes et chutes de tension n'augmentaient que raisonnablement avec la distance.

– La section de cuivre, donc le coût des conducteurs était très réduit comme l'illustre le schéma (xa) extrait d'un article de l'*Electrical Engineer*. Question d'autant plus vitale que le Syndicat français de Rothschild, détenteur majoritaire des mines de cuivre mondiales, avait intégré l'importance du cuivre dans l'électricité en augmentant encore son prix de 9 à 10 ct par pound (0,45 kg) en 1886, à 17 ct/p fin 1887 et 20 ct/p en 1888.

L'alternatif n'était pas sans inconvénient :

- Pas de moteur, sinon le moteur synchrone, ne démarrant pas seul.
- Pas de compteur d'énergie.
- Complexité de la théorie, lois, mesures, phénomènes parasites d'induction.
- Difficulté de comprendre qu'un fluide puisse transporter de l'énergie avec un va-et-vient, inexplicable par l'analogie hydraulique.



Le courant continu conservait des avantages :

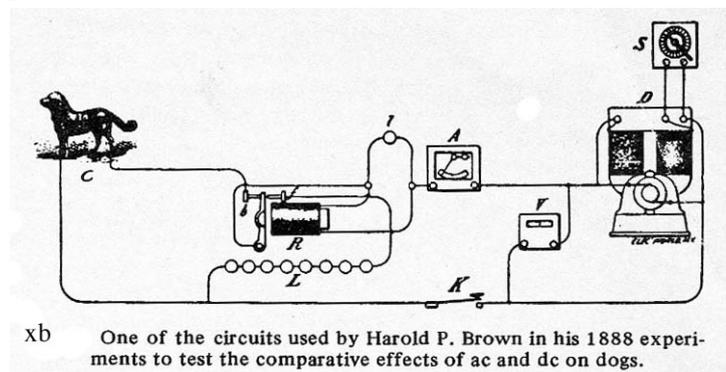
- Stockage d'énergie dans les accumulateurs. Dans les centrales, charge des accus pendant les heures de faible consommation pour écrêter les pointes du soir.
- Traction des premiers véhicules, tramways puis automobiles.
- Indispensable pour la galvanoplastie et l'électrochimie naissante.

Deux arguments pour l'opposition à l'alternatif s'effacèrent en 1888, l'un capital, l'absence de moteur, après les sérieux espoirs suscités par une brillante conférence d'un nouveau venu sur la scène électrique, Nikola Tesla. L'autre plus accessoire fut l'invention d'un premier compteur par le suisse François Borel basé sur un mini-moteur diphasé et d'un autre par Shallenberger, ingénieur de Westinghouse.

Ce dernier, réparant un régulateur de lampe à arc, laisse tomber un petit ressort sur l'électroaimant et remarque qu'il tournait lentement. En un mois, il réalise sur ce principe un compteur dont le disque tourne proportionnellement au courant alternatif traversant ; c'est encore le compteur d'aujourd'hui.

Edison, sans doute conscient de ses propres insuffisances sur le plan technique, suivit les conseils de son entourage de ne pas engager une polémique sur ce terrain.

Sa stratégie fut alors de se placer sur un terrain plus sensible au public, celui de la **sécurité humaine**, le danger des hautes tensions qui s'accroît un peu en alternatif. (19) Il trouva un porte-parole très actif, un certain Harold Brown. Celui-ci organisa en juillet 88 une grande réunion pour les électriciens au Columbia Collège. Son discours fut surtout une attaque contre les lampes à arc alimentées en alternatif, il proposait de faire appliquer aux compagnies un règlement en 6 points. Après discussions, il procéda à huit essais réels sur des chiens, sacrifiés sur l'autel de la Science, contrôlés et suivi d'autopsie par le Docteur Paterson (xb). La démonstration est faite qu'une tension d'au moins 1000 V en continu est nécessaire pour tuer un chien, alors que 200 V en alternatif suffisent (20).



La presse fit une large diffusion sur l'événement.

Une lettre ouverte de Brown publiée dans l'*Evening Post* concluait : « **Alternating current can be described by no adjective less forcible than *damnable*** » Il propose que le *Board of Electrical Control* interdise à New York toutes tensions alternatives supérieures à **300 V**.

On désigne aujourd'hui le **choc électrique** par le terme *électrisation*, qui entraîne la mort par *électrocution* dans près de 10% des cas.

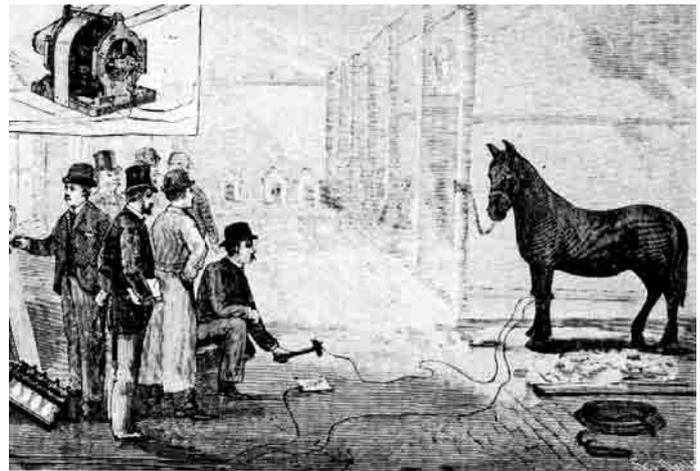
Il y a en France environ 250 morts par électrocution chaque année ; la moitié dans leur activité professionnelle, l'autre en milieu domestique. En comparaison, il y a 500 morts par le gaz, 800 par incendie.

Les électriciens résument la question : *ce ne sont pas les volts qui tuent, mais les ampères*. La loi d'Ohm nous dit que les ampères augmentent avec la tension et décroissent avec la résistance. Le corps humain ayant une résistance variable de 1000 à 10 000 ohms suivant qu'il est mouillé ou sec, on peut alors être électrocuté en sortant de la douche avec moins de 110 volts, et ne pas l'être en touchant une bouteille de Leyde chargée à 20 000 volts. Les intensités critiques pour le corps humain sont faibles :

- seuil de sensibilité de 0,5 à 1 mA - douleur à 5 mA
- entre 20 à 100 mA, conséquences graves possibles, s'accroissant rapidement avec la durée de passage et variables suivant le trajet du courant dans le corps
- au-delà de 1 A, brûlures, tétanisation des muscles et fibrillation du cœur.

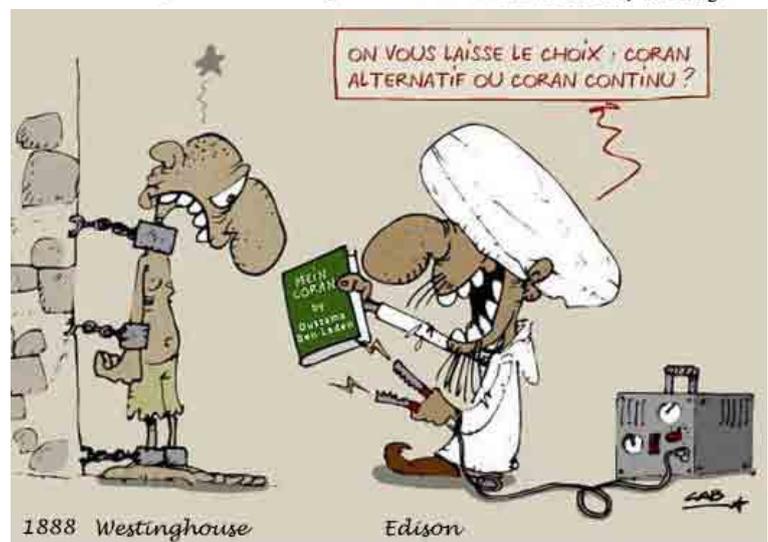
En décembre, Brown procède à d'autres essais publics d'électrocution de chevaux au laboratoire d'Edison à West Orange (xb2).

Peu après, il monte d'un cran encore la véhémence et lance dans plusieurs journaux un *challenge* personnel à George Westinghouse, une sorte de jugement de Dieu : Tous deux se feraient électriser publiquement pendant 5 secondes par des tensions croissantes de 50 V à partir de 100 V, lui en courant continu, son challenger en alternatif à 150 Hz. Cependant il le prévient qu'à partir de 160 V en alternatif, même un cheval est tué (xb3).



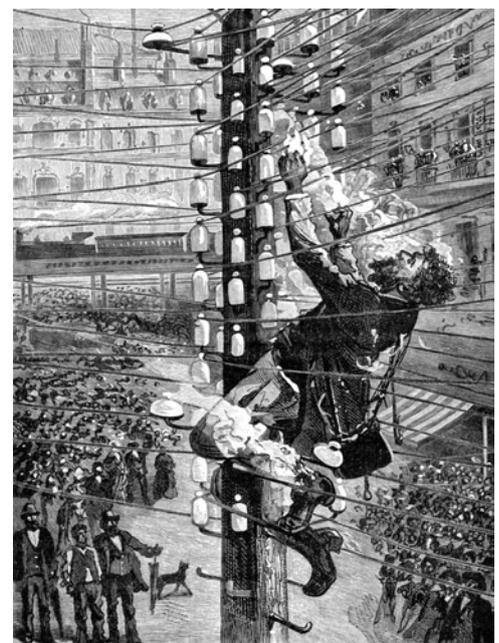
xb2 Experiments in killing animals in the Edison Laboratory at Orange

**Edison lui-même monte au créneau en 1889** et publie dans la *North American Revue* un article demandant l'interdiction totale du courant alternatif, en raison du grand danger vital qu'il présente ; *qu'il soit limité au moins à 300 V*. S'ajoutent d'autres arguments : *L'alternatif ne se justifie ni pour des raisons scientifiques ni commerciales. Les câbles souterrains en alternatif peuvent tuer les abonnés au téléphone par induction dans les câbles voisins. Leur isolant, soumis à une trépidation permanente à haute fréquence va se fissurer, laisser entrer l'humidité et faire circuler des courants dangereux dans le sol des villes.* (21)



Il y avait à ces débuts de l'électricité beaucoup plus d'électrocutés qu'aujourd'hui, par ignorance et manque de protections. Cependant l'un d'eux resta mémorable pour les New Yorkais. Le 12 décembre 1889, un télégraphiste monte sur un poteau pour une réparation de fil cassé, il s'emmêle avec les fils électriques voisins sous tension et s'électrocute sans pouvoir se dégager (xc). La foule présente à Chambers Street reste stupéfaite sans pouvoir agir pour couper le courant. Il fallut une demi-heure à la compagnie pour arriver. Pendant ce temps, l'homme restait pendu aux fils, grillait avec de la fumée et des flammèches sortaient de sa bouche. L'accident a-t-il renforcé les thèses d'Edison ? Ce n'est pas sûr, les fils étaient en courant continu. On envisagea de faire supprimer tous les fils aériens dans les rues des villes.

Par contre, Brown monta une opération plus efficace : La justice de l'Etat de New York envisageait de remplacer la pendaison des criminels par l'électrocution.



xc Brûlé vif par l'électricité - New York

Brown fit encourager le procédé auprès des juges en conseillant et même fournissant du matériel. Kemmler fut le premier condamné, exécuté le 6 août 1890 sur une chaise électrique pas encore au point (xe). On rapporte que ce fut affreux, il sursauta, mais ne mourut pas à la première décharge de 1000 volts pendant 17 secondes. La seconde tardait à venir, il était pris de contorsions violentes, l'écume coulait des lèvres. Enfin au retour du courant, le corps brûlait avec une odeur épouvantable.

La presse relata les faits, qui déclenchèrent des polémiques, surtout quand on apprit que c'était une dynamo alternative Westinghouse qui avait produit le courant. Brown, qui s'était discrètement procuré la machine et l'avait fourni gratuitement au pénitencier, aidait techniquement les journalistes à rédiger leurs papiers sur le pauvre condamné « *westinghoused* ».

Le Sénat de l'État de Virginie du engager des débats sur la limitation des tensions maximales à 800 V pour le continu, 550 V pour le courant ondulatoire, 200V pour l'alternatif. Dans l'État de New York, le Sénat discuta sur la proposition que vint soutenir Edison d'un maximum de 300 V pour l'alternatif. Ce fut rejeté.

En effet, fin 1890 le vent tourna en faveur de l'alternatif. Ce problème a été le principal motif de la restructuration de la compagnie Edison ; elle réduisait le célèbre inventeur à un rôle décoratif, mais sa réputation de savant restait bien entretenue, précieuse pour les banquiers (22).

Il a été rappelé que chez les scientifiques, le droit à l'erreur est reconnu, mais pas d'y persister. À la banque Morgan, ce droit semblait inconnu.

### *Le moteur en courant alternatif, à induction (asynchrone)*

Le verrou que constituait l'absence d'un moteur condamnait le courant alternatif à l'incapacité de transporter la force, seulement la lumière. Il va sauter simultanément, mais d'une façon indépendante, en Amérique comme en Europe.

Dès qu'il a connaissance du **mémoire de Ferraris** sur le moteur à induction à champ tournant, Westinghouse télégraphie à son ingénieur italien Pantaléoni, à Rome en mai 1888, pour qu'il demande au professeur l'autorisation de prendre à son nom aux États-Unis le brevet de son invention, pour l'acquérir ensuite. La réponse a d'abord été qu'il ne demandait rien et avait fait ces recherches dans l'intérêt de tous. L'argument qui réussit à le faire changer d'avis était l'engagement de la compagnie américaine à le développer, ce qui serait profitable à l'électricité en général. Finalement Ferraris accepta que Westinghouse dépose pour lui ce brevet américain, avec un simple cadeau de \$1000 pour ses propres recherches.

Quelques mois plus tard Ferraris fut profondément affecté quand on lui signala qu'un article de l'*Electrical World* décrivait l'un de ses moteurs, construit par la compagnie américaine qu'elle prétendait basé sur un principe développé par un certain Tesla, relatif aux rotations électromagnétiques.

Il est probable qu'il n'y a pas eu malhonnêteté de Westinghouse, qui venait d'acheter les brevets Tesla, car la comparaison entre l'appareil décrit et le modèle 3 de Ferraris est troublante, rien qu'à la ressemblance des deux prototypes, basés réellement sur un principe identique.

L'exécution des deux maquettes est visuellement assez semblable, si ce n'est que le rotor induit de Ferraris est massif, celui de Tesla est un enroulement en court-circuit, notable différence (xf).



xe Electrocutation de Kemmler le 6/8/1890

**Nikola Tesla**, serbe d'origine et croate de cœur disait-il, était arrivé aux États-Unis en 1884, puis après quelques déboires chez Edison, il crée une petite entreprise la *Tesla Electric Company* pour la fabrication de lampes à arc et travaille sur le courant alternatif et en particulier le moteur, sujet qui le passionnait depuis des années. Il dépose ses premiers brevets à la fin de l'année 1887 ; ils sont accordés et publiés le 1/5/1888. Leur intérêt se répandit dans le milieu des électriciens et W.A. Anthony, professeur d'électrotechnique à l'université Cornell, le fait inviter, bien qu'inconnu, à faire une conférence le 16 mai à l'A.I.E.E, *American Institut of Electrical Engineers*, intitulée « *A new system of alternate current motors and transformers* » (23). Il est possible que Tesla ait eu connaissance de la publication de Ferraris diffusée en avril, il lui fallait alors faire connaître rapidement ses travaux.

La conférence fut une révélation dans le monde des électriciens, à la fois sur le sujet à l'ordre du jour et le personnage, d'une belle prestance théâtrale, très bon orateur sachant tenir en haleine un auditoire de techniciens avec un discours simple et clair.

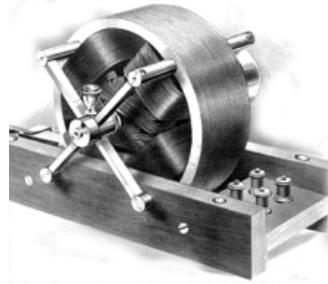
Il présente les schémas de trois moteurs, chacun avec un stator inducteur à 4 pôles, alimentés par les deux sources synchrones des deux enroulements d'un alternateur biphasé, mais décalées d'un quart de période :

- le premier a un rotor massif en fer constituant un moteur à réluctance qui ne démarre pas seul, mais peut tourner à vitesse synchrone. Il est illustré par le dessin du brevet du 12/10/1887 (xg) et par la photo (xh). Il ne fonctionne pas par induction, mais par la réaction magnétique dans un champ tournant.

- le second est un véritable moteur à induction à rotor bobiné qui démarre seul et tourne à une vitesse inférieure au synchronisme.

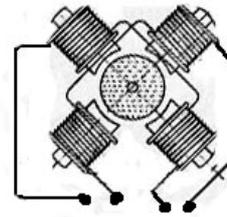
- le troisième est un moteur dont l'enroulement rotorique unique est alimenté en courant continu, c'est un moteur synchrone classique, c'est-à-dire un alternateur naturellement réversible. Il ne peut démarrer seul.

Deux petites machines prototypes accompagnent la présentation :



Tesla 1888

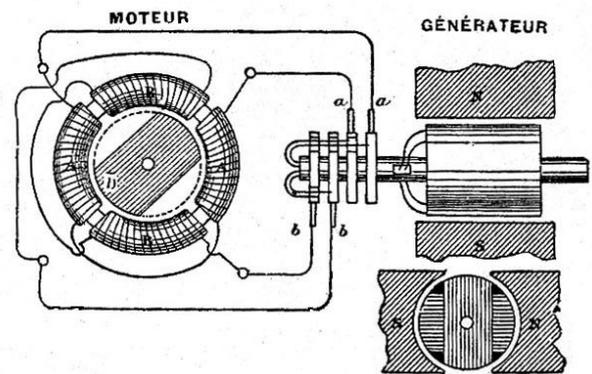
xf



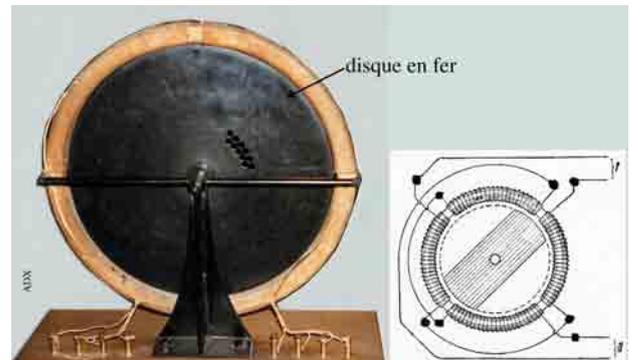
Moteurs à champ tournant



Ferraris 1886/88



xg Moteur synchrone et générateur biphasé Tesla



xh Moteur biphasé, synchrone, de Tesla - 1887



xj Moteur biphasé à induction de Tesla - 1888

– L'une est celle de la photo (xh), machine exposée au *Deutsches Museum* de Munich, probablement copie de celle du *Muséj Tesle* de Beograd. D'un diamètre de 0,4 m environ, sa puissance serait 1,5 HP avec un rendement de 60 %.

– L'autre est un moteur à induction de 0,5 HP et rendement de 50 %, sans doute celui de la photo (xj), unique exemplaire connu, exposé au Musée de Beograd.

Ce sont les deux seuls témoins matériels connus des nombreux appareils décrits dans les brevets de Tesla. Il a dû faire fabriquer ces deux maquettes en 1887 dans le laboratoire de la Tesla Co. La deuxième restera pendant cinq ans le seul moteur asynchrone fabriqué en Amérique.

Avec les brevets, Tesla appliqua la méthode américaine initiée par Edison, breveter tout ce qui vient à l'idée, sans se poser la question de l'intérêt réel du dispositif, ni s'il fonctionnait correctement. Il déposa donc des dizaines de brevets couvrant aussi le domaine déjà connu du courant alternatif à fréquence industrielle : moteurs synchrones et quelques asynchrones, générateurs polyphasés, systèmes de réseaux, transformateurs biphasés. Le plus souvent, cela concernait le système biphasé à 4 fils de transmission.

Il est étonnant qu'autant Tesla était prolifique en matière de rédaction de brevets, seulement deux de ses machines ont fait l'objet d'une maquette d'essai.

Un **système triphasé** à 6 fils apparaît uniquement dans deux brevets, mais sans point commun le réduisant à 3 fils. Tesla n'a donc pas compris ni utilisé le principal avantage du triphasé avec 3 fils, éventuellement 4.

Finalement ce sont deux ou trois brevets sur des moteurs biphasés à induction, asynchrone, qui firent plus tard l'objet d'un développement. Méprisant Edison, son meilleur ennemi, il l'a cependant imité en prenant par la suite 300 brevets sur divers sujets, dont très peu ont été suivis d'une application pratique.

Le mois suivant la conférence à l'AIEE, séduit par la personnalité et la compétence de cet ingénieur, Westinghouse abandonne la proposition gratuite de l'invention de Ferraris et achète ses brevets à Tesla. Il acquiert l'ensemble des brevets, les quatre récemment publiés et les autres à venir sur le courant alternatif et le moteur, soit 43 jusqu'en 1892. Une légende voudrait que Westinghouse ait payé ces brevets 1 million de dollars, alors que l'accord du 7 juillet 1888 avec la Westinghouse Co mentionne \$ 60 000, soit \$ 5000 en espèces, plus 150 actions de la Compagnie, en ajoutant un intéressement de \$ 2,5 pour chaque *Horse Power HP* de puissance électrique vendu. L'important pour Westinghouse n'était pas leur exploitation immédiate, mais surtout d'empêcher un autre de les fabriquer.

Industriel chevronné, Westinghouse savait bien qu'un brevet n'est pas une garantie de réaliser un appareil valable, l'avenir confirma sa prudence. Aussi il incita Tesla à venir à Pittsburgh, comme consultant à \$ 2000 par mois, pour collaborer au démarrage des fabrications. Celui-ci accepta ayant besoin d'argent, mais pas très heureux de quitter le milieu des « 400 fortunés » de New York, dans lequel il avait commencé à s'introduire. En effet Tesla, très bel homme, grand, plus de 2 m, à la tenue vestimentaire raffinée, appréciait les mondanités et un train de vie luxueux dans les grands hôtels, sa seule résidence toute sa vie.

**Tesla travaillera à Pittsburgh un an** avec l'équipe de C.F. Scott. Des difficultés apparurent rapidement, d'abord techniques, on s'aperçut que le moteur asynchrone biphasé simple, à deux paires de pôles, tournait beaucoup trop vite à la fréquence trop élevée de 133 Hz, adoptée pour réduire poids et dimensions des machines. Il fallait alors compliquer un peu en doublant le nombre de paires de pôles. On envisagea pour les nouveaux générateurs 40 puis 60 Hz, fréquence qui devint plus tard la référence en Amérique.

D'autre part, le système en alternatif de Westinghouse était monophasé, cela compliquait beaucoup de le changer en biphasé et l'on demanda à Tesla de réaliser un moteur monophasé, il prit quelques

brevets sur le sujet, mais n'arriva pas à les réaliser. S'ajoutant à des problèmes relationnels, cela se passa plutôt mal sur le plan de la coopération. Tesla avait bien cette brillante intelligence, mais il n'était pas fait pour le travail en équipe indispensable dans l'industrie, c'était un « loner », un solitaire. La mise au point pour la fabrication d'un appareil industriel avec la résolution des multiples difficultés inattendues n'était pas sa compétence.

Avoir des idées est relativement facile, dit-on, mais les transformer en réalisation concrète l'est beaucoup moins. Cette tentative de collaboration cessa d'un commun accord et Tesla reçut ses \$ 24 000 d'indemnité pour cette année à Pittsburgh. C'était une rémunération royale en regard d'un résultat décevant, mais Westinghouse avait besoin d'un esprit brillant dans son camp pour équilibrer la notoriété très populaire de son concurrent Edison. Il ne regrettait probablement pas d'avoir les brevets Tesla, même s'ils n'apportaient encore rien pour l'instant, il ne fallait pas qu'un autre les exploite.

Tesla repartit en Europe en 1889 visiter l'exposition de Paris puis revoir son pays et sa famille. À son retour, il reprend ses recherches et dépose encore quelques brevets, mais désormais indépendant de toute société, son caractère ne lui permettant pas de s'intégrer à une équipe. À partir de 1890, il ne s'intéresse plus au courant alternatif ordinaire à basse fréquence, et se consacra à d'autres recherches sur les très hautes fréquences (IV-3).

L'année **1892** fut celle du regroupement d'Edison et ses filiales, de Thomson Houston et d'autres, dans un puissant conglomérat, la *Général Electric Co.* Elle marquait la fin de la belle carrière industrielle d'Edison ; il n'avait même plus le rôle décoratif qu'il avait conservé dans le premier remaniement de 1889.

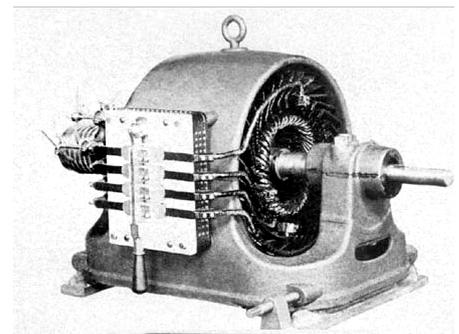
En face, Westinghouse restait seul devant ce groupe dominateur. Des manœuvres financières en bourse de la banque Morgan cherchaient à l'acculer à son absorption à bas prix par la G.E.Co, qui dominerait ainsi la totalité du marché électrique prometteur.

Des financiers amis s'aperçurent que, dans le contrat avec Tesla, la redevance de 2,5 \$ par HP électrique vendu, pouvait atteindre des millions de dollars et mettre Westinghouse à genoux. Celui-ci demanda à Tesla d'annuler ce contrat, sinon il coulait et Tesla aurait seul les banquiers devant lui. Celui-ci accepta car il avait confiance et de l'estime pour Westinghouse. Il reçut \$ 260 000 comme solde, alors que cet industriel n'avait pas encore vendu un seul moteur asynchrone.

En effet, les travaux pour industrialiser ce moteur avaient été arrêtés en 1890, après le départ de Tesla. Cela coïncidait avec la contestation par divers concurrents de la validité des brevets, en se basant sur l'antériorité réelle de l'Anglais W. Baily, de l'Américain Bradley et surtout de l'Italien Ferraris.

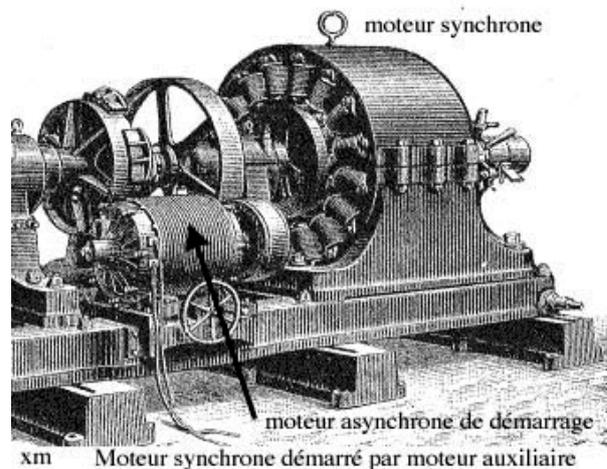
En 1891, le nouvel ingénieur en chef, B.G. Lamme, décide de reprendre la mise au point du moteur biphasé. Il change la conception en intégrant sur le rotor l'enroulement primaire, alimenté par le réseau ; ce qui nécessite des bagues et balais. L'induit secondaire est bobiné dans des encoches sur le stator (xk).

Par contre, le générateur biphasé qui doit alimenter ce moteur ne pose pas de problème. Il dérive facilement des générateurs monophasés, dont la fabrication était classique. Déjà en 1878, pour alimenter avec la même machine quatre circuits indépendants de lampes à arc, Gramme avait conçu un alternateur tétraphasé, dont il n'avait pas besoin comme tel. Précurseur du polyphasé sans le savoir, il aurait été surpris d'apprendre que chacun de ses quatre circuits, ou phase, était une sinusoïde décalée d'un quart de période du précédent.



Moteur diphasé Westinghouse-1892

En 1891, Westinghouse réalise enfin une première installation en biphasé pour un transport de force à la mine d'or de Telluride dans le Colorado, mais avec un moteur synchrone très particulier. Utilisant l'énergie d'une chute d'eau, une turbine entraîne un générateur monophasé ordinaire qui doit alimenter par deux fils, à une distance de 2,5 milles, un moteur synchrone de 100 HP sous 3000 V, à 133 Hz, semblable au générateur. Comme ce moteur ne peut démarrer seul, il est d'abord lancé par un petit moteur asynchrone type Tesla, mais en monophasé celui-ci ne démarre pas non plus, il faut le lancer vigoureusement à la main, ensuite il entraîne le gros moteur synchrone à vide, excitation ouverte, à une vitesse un peu supérieure à celle du synchronisme. À ce moment, le circuit d'excitation du moteur principal est fermé et le petit moteur de démarrage est coupé. Le moteur synchrone ralentit un peu et se synchronise (xm).



Heureusement, on ne démarrait le moteur qu'une fois par jour. Cette ancienne usine hydroélectrique existe toujours à Ames dans le Colorado.

Ce bricolage témoigne des débuts du moteur Tesla, 4 à 5 ans après le premier prototype.

À la fin de l'année 1891 arrive la nouvelle de l'expérience déterminante de Francfort (ci-après), un transport de 300 ch, sous 15 000 V triphasé sur 175 Km, vers un moteur asynchrone triphasé à rotor en cage d'écureuil de 100 ch.

C'est la stupéfaction aux États-Unis, particulièrement chez Westinghouse, où l'on restait un peu trop ébloui par les espoirs qu'avaient fait naître les brevets Tesla, difficiles à traduire en machines opérationnelles. Voilà que l'Europe se trouvait en avance, et avec une technique meilleure. Ceci à deux ans de la grande exposition internationale de Chicago prévue pour 1893. La compétition étant un bon stimulant, des moteurs asynchrones biphasés seront enfin commercialisés à partir de 1892.

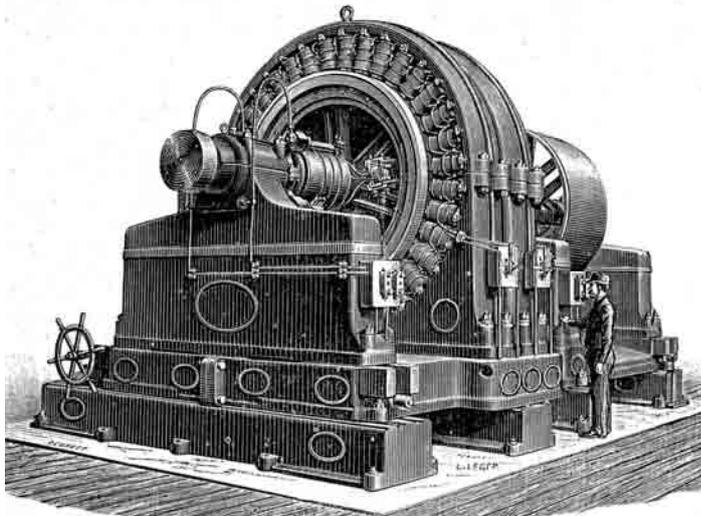
Il est néanmoins surprenant qu'il ait fallu plus de 4 ans à Westinghouse pour fabriquer un bon moteur à partir des brevets Tesla, nombre de ces solutions n'étant pas très intéressantes à approfondir, par exemple les moteurs synchrones déjà connus, mais ne démarrant pas seuls, comme celui installé à Telluride.

Pendant ce temps, la concurrence ne restait pas inactive, Thomson-Houston s'engageait en 1891 dans la voie d'un moteur à induction triphasé avec un induit rotorique particulier. Il échappait aux brevets de Tesla qui ne prévoyait pas le triphasé ; puis s'est trouvé absorbé en 1892 dans Général Electric Co. ou un jeune ingénieur d'origine allemande, Charles P. Steinmetz dirigeait le département de *Consulting Engineering*. Le moteur de G.E.Co, ayant l'induit sur le rotor, donc sans bagues ni frotteurs, était un avantage que Lamme va rattraper en adoptant, lui aussi, un induit rotorique, mais avec la solution allemande, la *squirrel cage*, brevetée par AEG, mais non breveté en Amérique, ce marché lui étant pratiquement fermé. Finalement en 1896, les deux géants américains de l'électricité signent un accord croisé autorisant chacun à utiliser le meilleur *design* de moteur, sans litige de brevet.

Ainsi le moteur asynchrone ne suscita pas en Amérique de grandes batailles juridiques de brevets comme le télégraphe, le téléphone et la lampe à incandescence. Il faut en remercier indirectement Ferraris pour son rare désintéressement.

### L'exposition internationale de 1893 à Chicago

*World's Columbian exposition*, quatre centième anniversaire de l'arrivée de Colomb en Amérique, fut un événement particulièrement important pour l'Amérique. Le gigantisme typique américain était illustré dans tous domaines : architectures, surfaces, matériels techniques, 70 000 exposants de toutes nations, 27 millions de visiteurs en 5 mois. Une compétition de prestige s'était engagée pour obtenir le contrat d'un éclairage électrique majestueux nécessitant 12 000 HP, avec l'installation de générateurs pour 3400 lampes à arc et 65 000 lampes à incandescence.



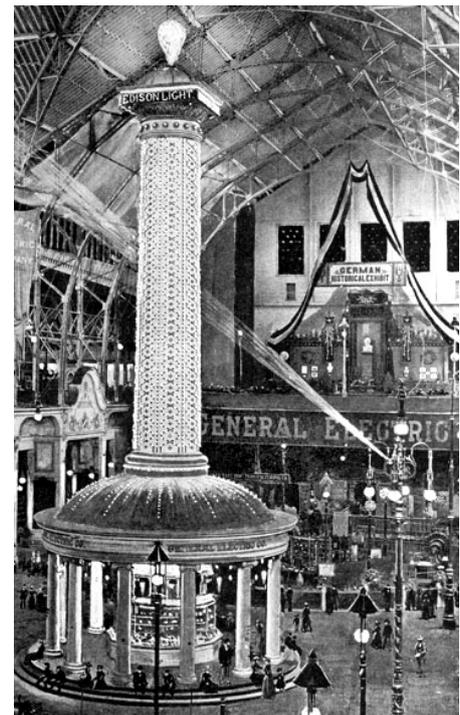
xn2 Alternateur Westinghouse, biphasé - 750 kw - Chicago 1893

Westinghouse la gagna. Les stands des deux grands concurrents étaient voisins. Celui de General Electric dominait le hall avec sa tour *Edison Light* (xn1), surmontée d'une lampe géante, éclairée par ce courant alternatif de Westinghouse, maudit par Edison.

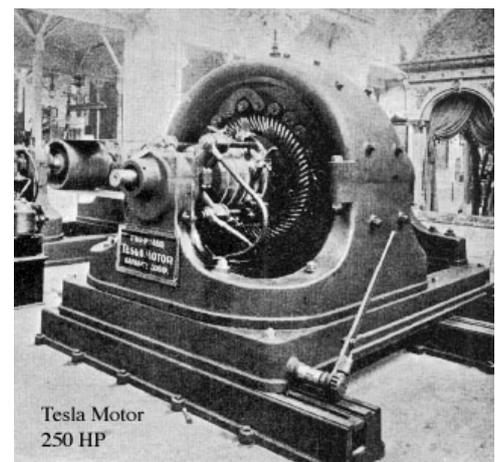
Un autre changement, discret mais significatif, apparut à l'exposition, les 340 tonnes/heure de vapeur nécessaires aux moteurs des générateurs électriques n'étaient pas produites classiquement par des chaudières chauffées au charbon, mais pour la première fois avec 25 t/h de pétrole. Une nouvelle ère énergétique débutait.

Malgré des progrès, les matériels présentés par Westinghouse utilisaient encore des solutions provisoires. Chacun des 12 grands alternateurs de 1000 HP (750 kW) était en principe biphasé, mais comme on le perçoit sur la gravure (xn2), c'était la juxtaposition de deux alternateurs de 500 HP débitant deux courants indépendants, seulement déphasés de 90°. Aussi la machine pesait 75 t.

Quant aux moteurs Tesla, il y avait d'une part des moteurs synchrones de 250 HP démarrés par un petit moteur auxiliaire, comme celui de Telluride (xm), d'autre part un gros moteur asynchrone biphasé de 250 HP, dont la construction était particulière (xn3). Les deux enroulements induits fermés n'étaient pas sur le rotor, mais sur le stator. Comme les enroulements inducteurs étaient rotoriques, il fallait des bagues et balais, proscrits par Tesla, pour les raccorder au réseau, et en plus il fallait réduire le courant de démarrage trop élevé en insérant des résistances rotoriques. Ces résistances, des tiges de charbons, rougissaient et chauffaient, alors elles étaient cachées dans le socle en fonte de la machine.



xn1 Tour Edison Light à Chicago - 1893



xn3 Moteur biphasé Westinghouse - Tesla 1893

L'Amérique souvent en avance pour les progrès techniques et industriels avait cette fois du retard. Westinghouse avait encore du chemin à faire pour arriver au niveau des alternateurs anglais Ferranti et des moteurs asynchrones allemands de Dobrowolsky. Surtout que l'équipement tellement rêvé du Niagara devenait maintenant envisageable, une sévère compétition se préparait. Westinghouse avait marqué un point contre son adversaire GECo en obtenant le contrat d'éclairage de l'exposition.

### En Allemagne

Au cours de cette décennie 81/91, la guerre des courants ne provoqua pas en Allemagne de controverses entre personnes ni sociétés. Il n'y a pas eu de véritable opposition à l'alternatif, seulement l'attentisme de certains, jusqu'au dénouement magistral de ce problème en 1891 à Francfort.

#### *Le triphasé - Haselwander*

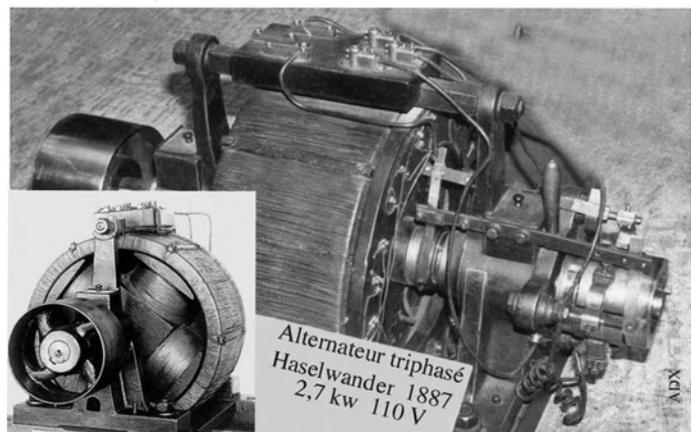
L'intérêt suscité pour l'alternatif avec le transformateur n'avait pas échappé aux électriciens, nombreux à chercher un moteur fonctionnant en alternatif. Un petit industriel d'Offenburg, Haselwander, avait un modeste atelier de construction électrique et installait des dynamos fonctionnant en moteur ou en générateur. Fin 1886, il réparait un générateur Thomson-Houston qui avait un rotor induit constitué de 3 bobines dont une extrémité était connectée à l'intérieur à un point commun et l'autre était reliée à un collecteur à 3 lames. Il trouvait compliqué que le courant alternatif induit du rotor soit redressé en continu au collecteur, puis transporté par deux fils jusqu'au moteur, et là ce continu rentrait par le collecteur pour y être à nouveau transformé dans le rotor du moteur vers 3 circuits en alternatif. Pourquoi ne pas éviter cette double transformation alternatif/continu, en transmettant directement au moteur le courant alternatif rotorique du générateur par trois fils ? Il fabriqua alors ces machines.

Dans cet **alternateur-moteur triphasé**, l'extrémité de chaque bobine du générateur qui allait au collecteur était reliée à l'une de trois bagues spéciales de sortie. De là partaient les 3 fils qui alimentaient une machine identique, mais fonctionnant en moteur. On rapporte qu'Elihu Thomson aurait discuté de cette idée avec son assistant Rice en 1882, mais ne l'aurait pas poursuivie. Pour éviter les trois bagues, l'inventeur inversa les fonctions stator/rotor en adoptant un stator en anneau, sur lequel étaient bobinées les trois phases de l'induit. Le rotor portait l'inducteur, 2 paires de pôles qu'il fallait alimenter en courant continu. Pour éviter une source auxiliaire, il monta un petit collecteur qui redressait une partie du courant principal de l'induit fixe.

Même si cette solution ne fut pas développée pour d'autres raisons, on reste un peu stupéfait de l'exactitude et la simplicité du raisonnement d'Haselwander. Les premières machines ne nécessitaient aucune mise au point, elles fonctionnaient. Le générateur et l'identique en moteur, fabriqués en juillet 1887, seront installés en octobre à la fabrique de chapeaux Adrion, où ils resteront en service jusqu'en 1890. D'une puissance de 2,7 kW, ils tournaient à 960 tr/min, donnant du 32 Hz. L'une de ces machines est exposée au Deutsches Museum. (xo)

**Haselwander** inventait ainsi un alternateur triphasé, fonctionnant aussi en moteur synchrone, ce qui ne présentait pas grand intérêt, mais surtout **découvrait le triphasé avec point neutre en étoile**, un élément essentiel pour les réseaux et le futur moteur asynchrone.

En mars 1888, il proposait dans un brevet le montage étoile-triangle, l'un des avantages du triphasé.



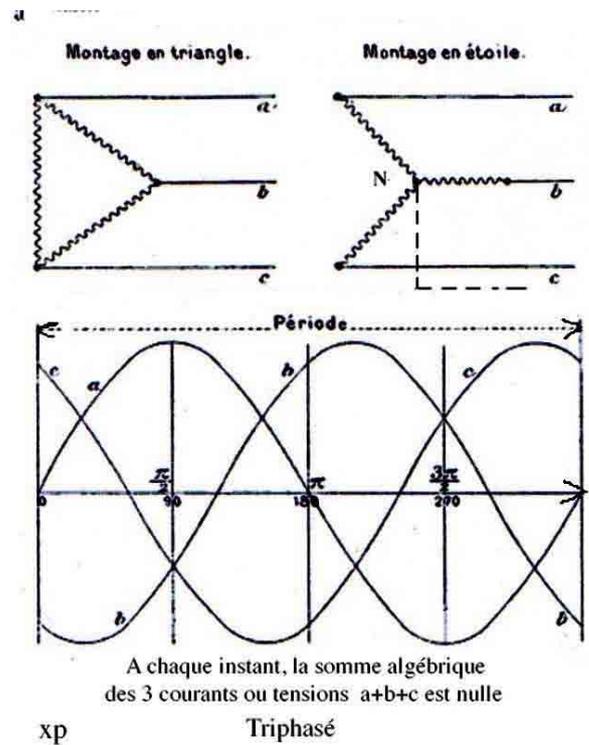
xo Alternateur - moteur triphasé Haselwander - 1887

Le brevet lui fut refusé sans raison, probablement mal rédigé. Il le repose l'année suivante, mais avait perdu l'antériorité.

Cet électricien n'était sans doute pas un intellectuel, mais un praticien observateur et réfléchi, qui avait probablement compris par intuition ce que l'on explique aujourd'hui aux élèves électriciens avec le schéma (xp), « à chaque instant, en triphasé, la somme algébrique des trois courants ou tensions est nulle ... si les trois sinusoïdes ont la même grandeur ». Ou encore, « A chaque instant, le courant qui passe dans une phase revient par les deux autres ».

La société Siemens lui propose de la rejoindre avec son invention, il refuse, préférant garder son indépendance. Une association avec Lameyer ne réussit pas non plus très bien, peut être un caractère difficile, ce qui ne retire rien à son mérite.

Le 10 août 1890, il réalise le premier **transport triphasé** de force mécanique de 15 PS depuis une scierie jusqu'à Offenburg, à 1 Km, sous 1000 V. Discrète préface au grand événement de l'année suivante à Francfort, où il sera presque oublié.

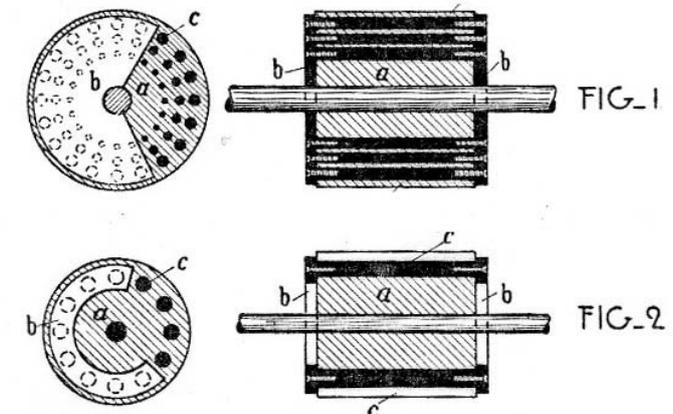


*Le moteur à induction de Dobrowolsky*

Michael von Dolivo Dobrowolsky, jeune ingénieur russe de St Petersburg, était venu étudier à Darmstadt, puis travailler en 1887 à l'AEG, *Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft*, société que venait de créer Emil Rathenau après dissolution de la *Deutsche Edison Gesellschaft*.

La communication de Ferraris en 1888 sur son moteur à champ tournant le passionne. Il entreprend à l'automne la construction d'un premier prototype de recherche, estimant que Ferraris avait fait l'erreur d'estimer ce rendement à seulement 50% ; mais en fait, c'était juste à la vitesse où il pensait que le moteur donnait sa puissance maximale, soit avec un glissement de 50 %. Le stator inducteur était exécuté comme un anneau Gramme, mais avec 24 encoches destinée à recevoir des bobines en nombre variable. Cette disposition permettait d'expérimenter la machine avec un nombre de phases modifiable, deux comme Ferraris, trois comme Haselwander, quatre ou six, simplement en modifiant le branchement de ces bobines.

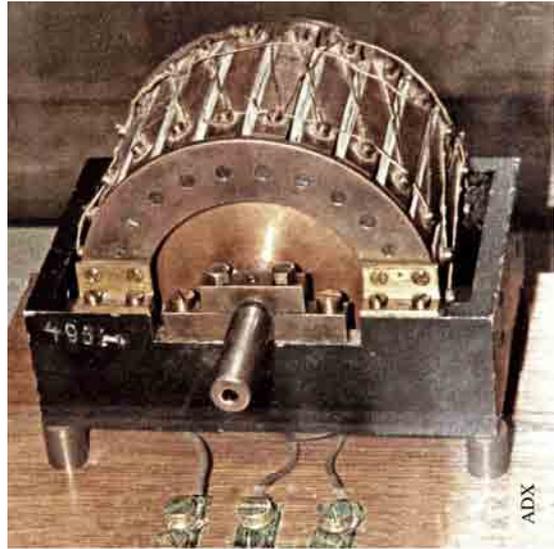
Pour le rotor, Dobrowolsky pensait accroître le champ magnétique dans l'induit avec une armature en fer et conserver le principe de l'induit massif de Ferraris, mais en diminuant sa résistance. Pour y parvenir, des trous étaient percés dans le cylindre feuilleté en tôles de fer permettant d'y enfiler des tiges de cuivre constituant les éléments actifs du bobinage induit. Elles étaient connectées en court-circuit aux deux extrémités par un anneau ou disque de cuivre perpendiculaire (xq). L'enroulement qu'elles constituaient ainsi ressemblait à une cage, d'où le nom de *Käfiganker*, ou *cage d'écureuil*.



xq Deux types d'induits à cage de Dolivo-Dobrowolsky brevet N° 51083 du 8/3/1889

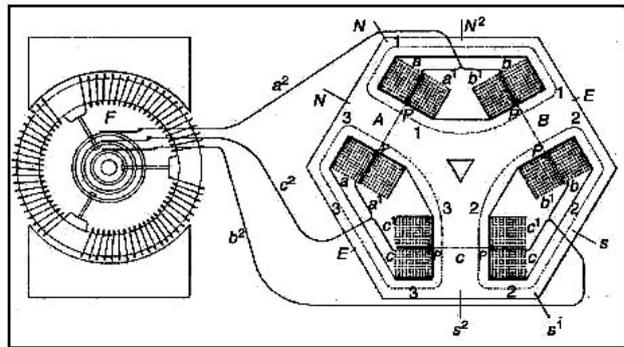
Une petite génératrice de 3 PS (Pferde Stärke = ch), à nombre de phases modifiable fut construite pour les essais du moteur. Début 1889, le prototype était au point et le système triphasé d'Haselwander s'avéra meilleur que le biphasé de Tesla, ou le tétraphasé de Gramme.

Ce premier appareil fut une heureuse surprise, un bon couple de démarrage, pas de vibrations, la vitesse maximum atteinte presque instantanément, impossible de le freiner à la main, bien que la puissance n'était encore que de 1/10 de cheval, mais avec un **rendement étonnant de 80 %** (xr), loin de la prévision pessimiste de Ferraris. Par analogie avec le principe du moteur « à champ tournant », Dolivo Dobrowolsky dénomme ce premier moteur triphasé « *Drehstrom* », à courant tournant, terme qui subsiste toujours.



Un brevet est pris le 8/3/1889 « *Armature (rotor) pour moteur à courant alternatif* ». Il n'est question que du rotor original en forme de cage d'écureuil, AEG ne mentionne pas le principe du champ tournant, considérant que son brevet n'est qu'un perfectionnement du moteur Ferraris, lequel avait volontairement placé son invention dans le domaine public, à la disposition de tous.

À la fin 1889, sont fabriqués des moteurs plus puissants de 3 à 5 PS pour rechercher des améliorations. Plus tard en 1890 d'autres brevets sont pris - le couplage étoile-triangle pour les moteurs, générateurs et transformateurs - la distribution en triphasé avec un quatrième fil pour le point neutre, permettant d'alimenter les circuits d'éclairage à une tension plus basse que les circuits de force motrice - la forme en étoile pour le circuit magnétique d'un transformateur triphasé (xs)



xs Transformateur triphasé Dolivo Dobrowolsky - brevet 1890

À la fin 1889, sont fabriqués des moteurs plus puissants de 3 à 5 PS pour rechercher des améliorations. Plus tard en 1890 d'autres brevets sont pris - le couplage étoile-triangle pour les moteurs, générateurs et transformateurs - la distribution en triphasé avec un quatrième fil pour le point neutre, permettant d'alimenter les circuits d'éclairage à une tension plus basse que les circuits de force motrice - la forme en étoile pour le circuit magnétique d'un transformateur triphasé (xs)

Les prototypes sont présentés à Wilhelm Siemens de Londres qui s'intéressait jusque-là au système courant continu à 5 fils. De même après sa visite de l'exposition de Paris en 1889, **Edison** fut invité à Berlin par AEG, qui succédait à sa filiale allemande.

Il confirma sa campagne aux États-Unis pour l'interdiction légale de toute tension alternative supérieure à 300 V : « *Non, non, le courant alternatif est une absurdité, il n'a aucun avenir, je ne veux rien savoir ni voir sur le courant alternatif* ». Stupéfiante obstination devant l'évidence.

Cela ne correspond guère avec la légende toujours vivace du savant, inventeur de génie. Comme il a été déjà été remarqué, un scientifique ou un ingénieur a le droit à l'erreur, mais sans s'y accrocher quand les faits prouvent le contraire. Mais les mythes ont la vie dure (25).

Au cours de l'été 1890, Oberst Huber, directeur de la *Machinen Fabrik Oerlikon* de Zürich (MFO), accompagné de son ingénieur en chef, Charles E. L. **Brown**, viennent examiner les nouveaux moteurs. En effet MFO avait commencé à faire des installations à courant alternatif, mais cherchait aussi un moteur. Une coopération pour des études dans ce domaine fut envisagée, mais pour le moteur, AEG demandait une redevance pour chaque PS livré. Après 1891, les relations entre les deux sociétés furent parfois difficiles sur cette question du brevet.

Le premier moteur asynchrone de faible puissance, 5 PS, était donc au point, il ne faudra qu'un an pour concevoir, sans étape intermédiaire, un premier moteur de 100 PS pour l'exposition de Francfort.

Multiplier par 20 fois en une seule étape la puissance d'une machine à partir d'un prototype est un rare exploit. Cela dénote la compétence et l'efficacité dont Dolivo Dobrowsky a fait preuve à l'AEG, alors que chez Westinghouse il faudra plus de quatre ans (1888-1892) pour construire, d'après les brevets Tesla, des moteurs biphasés, moins performants.

### *Le grand défi de Francfort (1891) (26)*

Les éléments du transport d'électricité à distance, constituants de nos réseaux modernes, étaient pratiquement inventés ou définis en 1890. Restait à démontrer leur compatibilité d'ensemble, à une forte puissance, sur une grande distance, donc à haute tension. C'était une opération risquée et coûteuse, que la conjonction de plusieurs opportunités allait rendre possible, grâce à l'audace, la compétence et la ténacité d'une équipe d'ingénieurs suisses et allemands

**Oskar von Miller**, l'ingénieur bavarois qui avait organisé en 1882 la première expérience de Deprez pour l'exposition de Munich, dirigeait les services techniques du Royaume de Bavière. Il participait aussi au directoire de l'AEG et venait d'être chargé de la conception d'un transport d'électricité, pour la fabrique bavaroise de ciment Portland, sur une distance de 12 Km de Lauffen à Heilbronn. À Lauffen, sur le Neckar, cette fabrique avait une chute capable de 1500 PS. Déjà 600 PS étaient exploités par deux turbines de 300 PS et le projet était d'en installer une troisième pour transporter son énergie à Heilbronn.

Par ailleurs, la ville de Francfort-sur-le-Main avait demandé à plusieurs constructeurs, dont AEG, d'étudier l'électrification de la ville et envisageait de faire une exposition sur ce thème, uniquement à l'échelon allemand au début.

Von Miller pensait adopter le courant alternatif monophasé pour le transport de l'énergie du Neckar depuis Lauffen, mais se posait alors le problème des moteurs à Heilbronn. À l'AEG, Rathenau le convainquit d'adopter le triphasé permettant d'utiliser le nouveau moteur asynchrone en développement, bien que le seul moteur en essai ne dépassât pas 5 PS.

La construction d'un alternateur triphasé ne posait pas de problème à un autre futur partenaire suisse, Oerlikon. Son dynamique ingénieur en chef Charles Brown avait réalisé l'un des premiers transports en alternatif, deux ans plus tôt à Thorenberg.

Il fallait la ténacité et la persuasion de von Miller pour faire converger ces différents projets vers un objectif commun : réaliser à Lauffen la station de départ définitive pour 300 PS en triphasé, non pour transmettre aussitôt l'énergie à Heilbronn, mais temporairement jusqu'à Francfort, à 175 Km, par une ligne provisoire à établir. Cette distance considérable imposait une tension élevée, jamais réalisée, d'au moins 15 000 volts en triphasé. À Francfort, la station de réception fournirait l'énergie à un moteur triphasé puissant et divers récepteurs dans la foire. Après l'exposition, le matériel de Francfort et la ligne seraient en partie démontés et installés à Heilbronn.

Le 6 décembre 1890 l'ensemble est planifié entre les différents partenaires, avec l'efficacité de l'organisation allemande, von Miller assurant la coordination générale :

- La ville de Francfort organisera l'exposition, la troisième après Munich et Turin, sur le thème récurrent du transport de force par l'électricité. Elle s'ouvrira à peine six mois plus tard, le 16 mai 1891.

- La spectaculaire démonstration technique, le transport de Force en triphasé haute tension sur 175 Km, sera assurée avec les matériels fabriqués conjointement par AEG et Oerlikon et installés à Lauffen et Francfort.

- La ligne triphasé de 175 Km sera installée en six mois sous le contrôle des deux sociétés par le service impérial des Postes, avec une subvention de 10 000 DM accordée par l'empereur Guillaume II, s'ajoutant à l'aide des quatre régions traversées, Wurtemberg, Bade, Hesse et Prusse

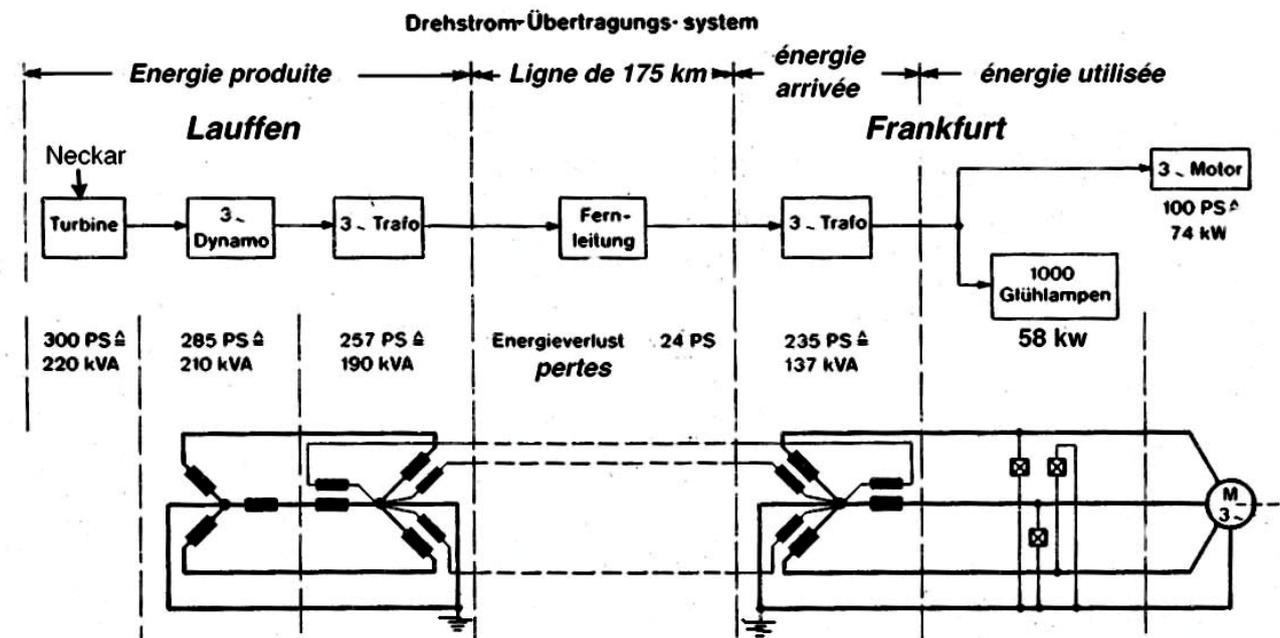
- À la fin de l'exposition, en septembre, la Société internationale des électriciens sera invitée à se réunir en Congrès.

Avant de passer à la construction du transport Lauffen-Francfort, il fallait définir des choix dans ces nouveaux domaines. Pour le moteur asynchrone, passer d'un prototype de 5 PS à 100 PS, c'était prendre un risque important, la loi du progrès. Les transformateurs existaient en monophasé, mais moins puissants, et isolés dans l'air ; après quelques essais, l'isolement et le refroidissement dans la nouvelle huile minérale extraite du pétrole furent adoptés. Pour la dynamo en courant alternatif triphasé (l'*alternateur*), l'extrapolation des machines en monophasé n'était pas un problème.

La principale inconnue était **la ligne aérienne**, les pertes d'isolement sur une longueur et avec une tension jamais approchée imposaient des essais préliminaires. Une **installation d'essais** fut construite rapidement à Oerlikon et mise sous tension dès le mois de novembre 1890. La ligne d'essai en monophasé représentait 8 km en aller et retour depuis la station d'essai. Les fils nus étaient éloignés de 30 cm, suspendus à des isolateurs en porcelaine comportant des couronnes remplies d'huile, de quatre modèles différents. La tension était réglée entre 30 et 40 000 volts en permanence. Des coupe-circuits fusibles en plomb devaient couper le courant de défaut en cas de défaillance de l'isolement, ou d'un court-circuit établi volontairement. Sur la centaine d'isolateurs en essai, aucun ne fut défaillant.

Les essais officiels eurent lieu le 24 janvier 1890 devant plusieurs responsables. L'une des expériences consistait à rapprocher les fils progressivement : entre 18 et 22 mm, un claquage s'amorçait, ce qui donnait la marge de sécurité. La mise à la terre d'un circuit ne produisait pas d'anomalie, de même l'arrosage des isolateurs de diminution d'isolement. On en conclut que l'installation pouvait tenir à 30 kV et en fonction de différents autres critères, le coefficient de sécurité de deux fut adopté, donc une tension entre phases de 15 kV avec un montage étoile et neutre raccordé à la terre, donc une tension simple de 8,5 kV.

L'ensemble de l'installation comprenait trois éléments : la station de départ de Lauffen où était produite l'énergie en haute tension, la ligne de 175 Km et l'installation réceptrice de l'exposition à Francfort avec moteur et éclairage. Le schéma (xu) indique les puissances nominales des différentes machines



Transport de force en triphasé 15 000 V de Lauffen à Francfort - 1891

À **Lauffen**, tout le matériel, alternateur, transformateur, tableau de contrôle et mesure étaient construits par Oerlikon (xv1).

L'alternateur attelé à une turbine était nécessairement lent, 450 tr/min, donc à inducteur multipolaire de six paires de pôles, ce qui donnait une fréquence de 45 périodes/s.

Sa puissance était de 285 PS, soit 210 kVA, sous une tension faible de 50 V, impliquant un courant important de 1400 A par phase, en montage étoile.

Pour cette intensité, l'enroulement induit était constitué de trois groupes de 32 barres en cuivre de 29 mm de diamètre enfilées dans les 96 trous au diamètre de 33 mm du noyau magnétique feuilleté, ce qui permettait une épaisseur d'isolant faible de 2 mm. Si ce n'est son poids élevé de 9 t, ce premier alternateur triphasé avait une technique proche des machines actuelles.

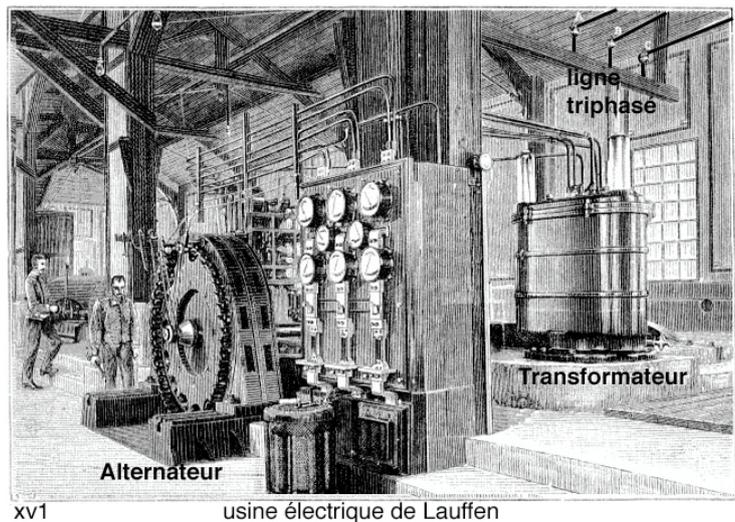
Son rendement atteignait 96 %. L'excitation était fournie par une petite dynamo de 1200 W. Pour réparation, c'était le stator induit que l'on faisait glisser pour dégager l'inducteur.

La machine a fonctionné jusqu'en 1910, puis a été transférée au Deutsches Museum de Munich, le premier des grands musées techniques, fondé en 1903, précisément par von Miller (xv2).

Le **transformateur, premier appareil triphasé**, immergé dans l'huile, avait une culasse magnétique en forme d'étoile suivant le brevet de Dolivo Dobrowolsky. Les enroulements étaient montés en étoile avec le point neutre relié à la terre, ce qui apparaissait comme la meilleure mesure de sécurité pour les personnes et vis-à-vis des phénomènes orageux.

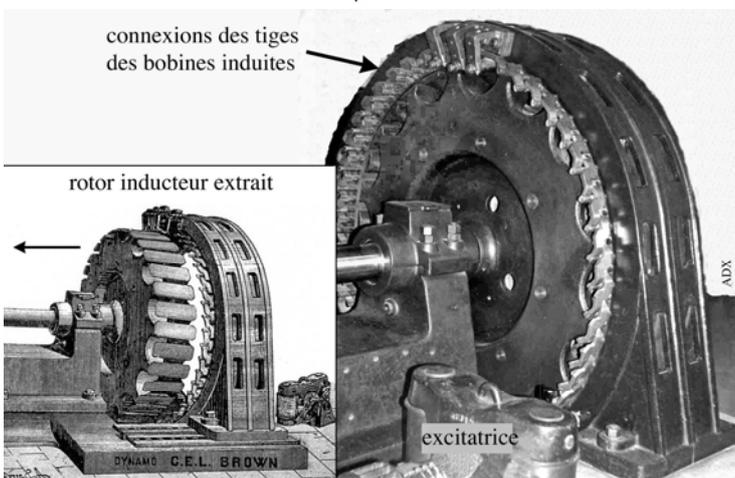
Les trois fils de phase haute tension, sortant du transformateur, montaient au-dessus du bâtiment et leur raccordement à la ligne aérienne se faisait après avoir traversé des coupe-circuits, fils fusibles en cuivre de faible section, longs de 2 m. Si le courant dépassait trop sa valeur normale, ils fondaient et le courant était interrompu après avoir provoqué un arc fugitif. L'alternatif haute tension se coupait bien plus facilement que le continu.

En cas de nécessité, la mise hors tension rapide de la ligne était prévue en plusieurs endroits le long du parcours ; des étriers pouvaient mettre en court-circuit les trois fils, déclenchant ainsi la fusion des coupe-circuits de Lauffen. Seuls ces appareillages de sécurité étaient encore artisanaux (27).



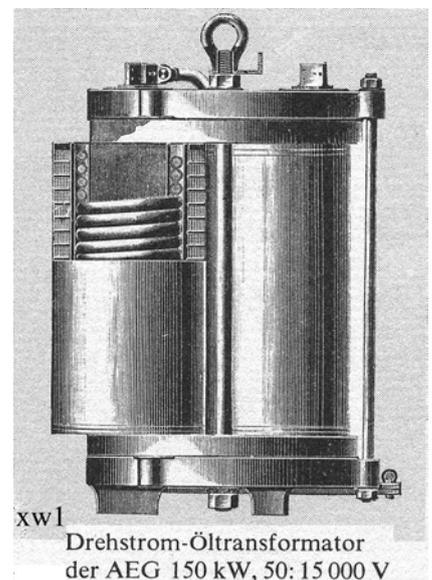
xv1

usine électrique de Lauffen



xv2

Alternateur triphasé Brown - 210 kva - 55 V - Lauffen 1891

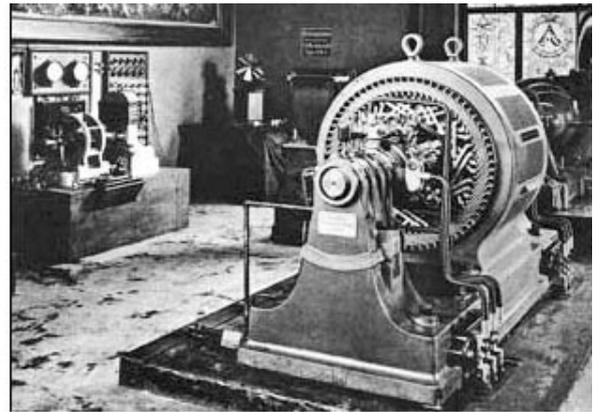


xw1

Drehstrom-Öltransformator der AEG 150 kW, 50: 15 000 V



xw3 chute d'eau à l'exposition de Francfort

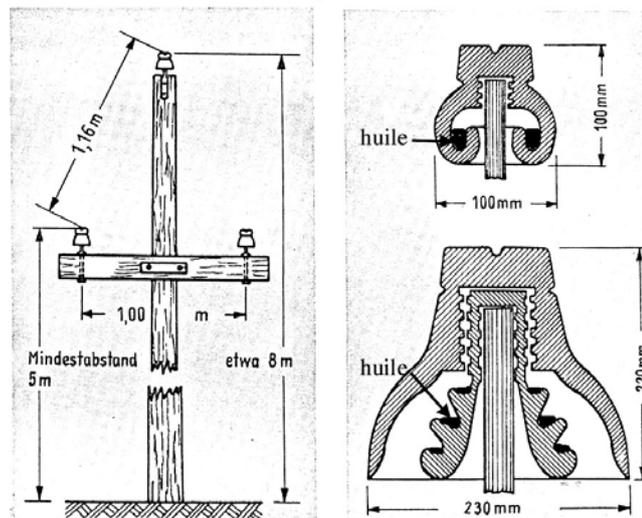


xw2 Francfort - moteur asynchrone AEG 100 PS

À **Francfort**, l'installation était réalisée par AEG, ce premier transformateur de 150 kVA avait aussi un circuit magnétique en étoile (xw1). Il alimentait simultanément un réseau de 1060 lampes à incandescence et le **moteur asynchrone à cage de 100 PS**, le premier au monde (xw2). Une pompe de 60 PS attelée au moteur remontait de l'eau sur une hauteur de 10 m et retombait comme une chute d'eau dans un petit lac artificiel. Le soir, de puissants projecteurs à arc la transformait en fontaine lumineuse (xw3).

Pour cette dernière démonstration de transport de force, on renouvelait le symbolisme de l'énergie hydraulique du Neckar, convertie en électricité à Lauffen, transportée à Francfort, puis transformée en une autre cascade.

La **ligne aérienne** de 175 Km avait nécessité 60 t de fil de cuivre de 4 mm, supporté par 3180 poteaux bois, au moyen de 9600 isolateurs en porcelaine, extrapolés de ceux du télégraphe (xx). Leur forme en cloche protégeait les ondulations en



xx Ligne Lauffen - Francfort Poteaux et isolateurs à huile

couronnes creuses, remplies d'huile. Le gros modèle, très coûteux à fabriquer comme à remplir d'huile après montage, n'a été utilisé que sur les 50 premiers km ; le petit modèle à une seule couronne d'huile sur le reste du parcours. Il n'y eut que trois défauts d'isolement.

Ce surcroît de précaution en utilisant de l'huile nous étonne. Les pertes aux isolateurs étaient une grande inconnue, les expériences précédentes de lignes aériennes sur des isolateurs de lignes télégraphiques n'ayant pas dépassé 3000 volts en continu.

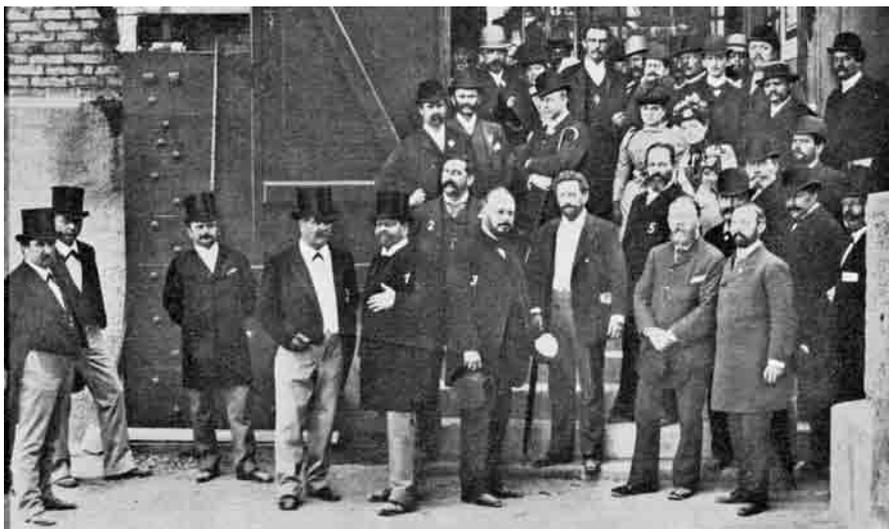
Dans son N° 12 du 6/2/ 1891, l'*Electrotechnische Zeitschrift*, ETZ publiait une lettre de A. Schneller dont les calculs prouvaient qu'avec les pertes aux isolateurs, sur les 300 PS générés à Lauffen, seulement 37 PS arriveraient à Francfort. *La Lumière électrique*, dont l'allergie au courant alternatif n'avait pas faibli, en fit aussitôt l'écho.

L'installation fut terminée comme prévu et mise en service le 24 août 1891, après divers essais et vérifications, sans les incidents toujours possibles sur une installation d'une telle nouveauté. Ce fut un soulagement général. Les premières mesures électriques indiquaient un très bon rendement, au-dessus de 70%. Le lendemain les 1000 lampes s'allumèrent et la belle cascade illuminée jaillit de la bouche d'un dragon.

E. Rathenau, directeur d'AEG, et O. von Miller prononcèrent deux allocutions devant une foule d'invités dont la presse allemande et étrangère. Rathenau estimait que d'ici peu d'années, la force électrique serait transportée plus loin encore sous 100 000 volts ; sa prédiction mit 20 ans à se réaliser.

Le correspondant du *Times* relatait l'évènement : *je pense très objectivement que le transport de force Lauffen - Francfort est la plus importante*

*et significative expérience dans la technique électrique, depuis que cette force naturelle mystérieuse a été asservie par les hommes.*



xy

Visite à Lauffen des autorités techniques et industrielles

Von Miller emmena ses principaux invités à la station de Lauffen et, muni d'un nouvel appareil rare, les photographia pour nous conserver les visages des réalisateurs de cette page mémorable de l'histoire de l'électricité (xy). Avec surprise, on peut distinguer (n°3) Marcel Deprez, l'homme qu'il avait déjà invité à Munich en 1882 pour leur premier transport de force en continu et avait ensuite tant lutté contre l'alternatif. On peut supposer que Deprez n'a pas osé refuser cette courtoise invitation, avec certes une certaine gêne.

**L'exposition** elle-même, que les organisateurs souhaitaient internationale, rassembla en majorité des industriels allemands. Comme dans les précédentes manifestations, étaient regroupés en 12 sections tous les matériels relatifs à la production, distribution et multiples utilisations de l'électricité-énergie comme ceux exploités par l'électricité-information : télégraphes, téléphones, avertisseurs, sécurité des chemins de fer, mesures. À peine remarqués, figuraient aussi les résonateurs du professeur Hertz, qui allaient bientôt révéler l'immense domaine du transport d'information sans fil.

En ce qui concernait le nouveau courant alternatif, sa production en triphasé et les recherches en cours vers des moteurs, plusieurs constructeurs présentaient leurs innovations :

- Lahmeyer de Francfort avait installé une génératrice triphasé actionnant plus loin divers moteurs.
- Haselwander présentait sa machine historique, un moteur synchrone de 10 PS à induit rotorique à trois bagues et d'autres petits moteurs. Il était probablement dépité de ne pas être reconnu comme étant à l'origine du triphasé ; particulièrement envers Dolivo Dobrowolsky qui avait breveté ce système, alors que ses propres brevets, sans doute mal rédigés, lui avaient été refusés.

- Schuckert avait deux importants générateurs diphasés, l'un actionnait une station de prise d'eau sur le Main, l'autre installée dans le Jardin des plantes à 1,5 km alimentait le hall de l'exposition et plusieurs moteurs.

- Siemens exposait trois générateurs triphasés de conception différente ainsi que plusieurs petits moteurs. Ce constructeur, le plus ancien, important et innovant d'Europe, était resté peu actif dans cette mutation du continu vers l'alternatif. Le fondateur, Werner Von Siemens, anobli par l'Empereur en 1888 était âgé. Il avait quitté la direction de la société en 1889 et sans s'opposer comme d'autres à l'alternatif, estimait que le courant continu resterait incontournable. C'était néanmoins le principal constructeur d'alternateurs depuis 1880.

En Allemagne comme en Angleterre, ce furent des hommes jeunes, dans des entreprises débutantes (start-up ?) qui eurent l'audace de bousculer les traditionalistes du courant continu et de conclure brillamment dix années d'hésitations scientifiques et techniques.

Les industriels et scientifiques suisses et allemands, confiants dans la réussite de leur projet, malgré ses risques, avaient proposé à la Société Internationale des Electriciens de tenir un **Congrès du 7 au 13 septembre**. C'était plutôt une opération de communication pour marquer ce succès, car il n'y avait pas de question importante nécessitant une nouvelle réunion, deux ans après celle de 1889 à Paris. Néanmoins 650 membres étaient présents, car c'était une rare occasion d'échanges entre spécialistes ; parmi les 190 étrangers, on dénombrait 46 anglais, 19 italiens et seulement 16 français qui devaient regretter amèrement l'opposition à l'alternatif de la majorité de leurs élites scientifiques. Une délégation de 8 membres de l'A.I.E.E avaient traversé spécialement l'Atlantique.

La présidence du congrès fut confiée à Werner Von Siemens, en hommage au fondateur de la première entreprise électrique en 1847, l'une des plus dynamique du monde encore aujourd'hui. Il décédait l'année suivante, après une vie bien remplie, au service de l'électricité. Parmi les cinq vice-présidents étrangers, l'Italie était représentée par Ferraris, la France par E. Hospitalier, journaliste scientifique, l'un des rares à ne pas avoir rejeté le courant alternatif. Suivant l'usage établi, les sujets étaient répartis dans plusieurs sections, puis résumés dans trois assemblées générales. On discuta des unités, l'un des sujets sur lesquels un consensus pouvait être obtenu après quelques négociations. Les choix du *joule* pour l'énergie et du *watt* pour la puissance, proposés en 1889, furent entérinés. L'adoption d'autres unités, *gauss*, *henry* et *weber* furent reportée au prochain congrès.

Parmi les communications, deux furent remarquables. L'une était présentée par Zipernowsky, sur un projet de chemin de fer électrique à très grande vitesse, entre les deux capitales de l'Empire, Vienne et Budapest, séparées de 250 Km. Les locomotives rouleraient à 200 Km/h propulsées par quatre moteurs de 200 PS, alimentés en courant continu depuis des sous-stations réparties sur le trajet. De nombreux problèmes restaient à résoudre ; le TGV était encore loin. Pas tant que cela, puisqu'en 1903, Siemens et AEG faisaient rouler à 200 km/h sur 25 Km, chacun une motrice prototype à moteur asynchrone triphasé (ch. IX-5).

Une autre communication du professeur anglais de la Royal Academy, *Sylvanus Thompson*, retraçait l'historique des courants alternatifs en évoquant les travaux sur le moteur asynchrone de Ferraris, Elihu Thomson et Tesla.

Au repas de clôture, Ferraris fut nommé *père du triphasé*, motion pas très sympathique pour Haselwander, petit industriel inconnu, surtout que Ferraris n'avait travaillé que sur le biphasé. (28)

Après le Congrès, la **Commission des essais** de l'exposition, dirigée par le professeur F. Weber de Zürich, comprenant 10 membres professeurs et ingénieurs, procéda à 17 séries de mesures du 11 au 15 octobre. Différentes valeurs de puissance transmise par la turbine hydraulique, échelonnées de 120 à 197 PS, permirent de préparer un rapport officiel détaillé ; le rendement électrique se situait entre 78 et 83% et le rendement total mécanique de 71 à 75%.

Le rendement des transfos était de 90% pour celui de départ, 95% pour celui d'arrivée. Tous ces chiffres sont étonnamment bons, bien supérieurs à ceux de Turin, la précédente expérience en 1884.

Des problèmes d'interprétation des mesures apparurent, d'où quelques contestations, le courant alternatif ne se définissant aussi simplement que le continu :

– D'abord la difficulté de mesurer la valeur d'une grandeur sinusoïdale variant à tout instant. Le congrès des électriciens de 1889 avait défini l'*intensité efficace* ou énergétique :

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2 dt}$$

– La puissance, produit de la tension par le courant en continu,  $P = U.I$ , devenait en alternatif la *puissance apparente*, exprimée en volt/ampère ou VA.

La *puissance active*, tenant compte du déphasage courant/tension  $\phi$ , était  $P_a = U.I \cdot \cos\phi$ , exprimée en watt W. Mais on ne savait pas encore ni mesurer, ni calculer ce déphasage.

– Les électriciens découvrirent indirectement l'importance du déphasage provoqué par le moteur asynchrone, un inconvénient de l'énergie réactive qu'il absorbait, problème encore incompris quelques années.

Les organisateurs avaient envisagé un dernier essai important mais risqué, qui fut exécuté prudemment après le départ des congressistes : rajouter un transformateur en série, pour monter aux limites la tension entre phases du circuit de 15 kV à 20, 25, puis **30 000 volts**. Ce fut un succès, un seul isolateur eut un défaut.

Le **coût global** de l'opération se montait à 350 000 F suisses d'après E. Huber, dirigeant d'Oerlikon ; soit 1500 F par PS transporté, dont 1250 F pour la seule ligne aérienne. La station de Lauffen devait être réutilisée pour alimenter Heilbronn un an plus tard.

Charles Brown quitta la société Oerlikon en 1891 pour fonder avec Boveri une nouvelle société, Brown Boveri Compagnie, BBC, qui deviendra l'une des grandes sociétés électrotechniques européennes jusqu'à sa fusion en 1976 avec ASEA, autre importante société suédoise, pour constituer ABB.

### Le transport de Force, en résumé

Comme pour tout évènement historique mondial, les épisodes de la résolution du problème de transport de l'énergie par l'électricité ont été décrits successivement dans différents pays, alors qu'ils se sont déroulés, en parallèle, presque simultanément, avec nombre d'acteurs, tout au long de cette décennie 1880.

Une brève synthèse chronologique permet de dégager l'apport essentiel de chaque étape vers la solution définitive.

Trois phases se discernent : les tentatives avec le courant continu haute tension, puis le courant alternatif monophasé avec le transformateur, et enfin les systèmes polyphasés rendant possible le moteur asynchrone.

**1** - Les quatre **expériences de Deprez** (1882/86) avaient démontré que la solution du courant continu à haute tension avec une seule grosse machine n'était plus viable au-delà de 3000 volts. L'expérience de **Fontaine** (1886) permettait néanmoins de monter à des tensions très élevées en courant continu, peut-être les 80 000 volts espérés, mais avec plusieurs machines classiques mises en série ; l'avenir montrera que c'est une solution viable, mais seulement pour des cas particuliers, sans interconnexion.

**2** - L'éclairage du métro de **Londres** puis l'expérience de **Turin** par **Gaulard** (1883/84) démontrent que le **courant alternatif monophasé et le transformateur**, sous 2000 volts, apportent une solution au transport, mais la distribution avec transformateurs en série n'est pas adaptée, il faut une distribution avec générateurs en parallèle et récepteurs en dérivation. L'absence de moteur en alternatif limite ce système à l'éclairage, sans force motrice.

**3** - En 1885 les travaux de **Ferraris** sur le transformateur lui permettent de fabriquer une première maquette d'un **moteur à induction biphasé** à rotor massif. Il pense que cet appareil d'expérience n'a pas d'intérêt pratique et ne le fait pas connaître.

**4** - Les hongrois de Ganz, **Zipernowsky, Déri et Blathy** perfectionnent le système Gaulard avec une **distribution en dérivation**, utilisant un transformateur à circuit magnétique fermé, sans réglage (1885/86). Solution adoptée par les autres suiveurs et Gaulard lui-même pour transporter l'électricité sous 2400 V.

**5** - Démonstration en 1886 à Great Barrington, aux États-Unis d'une distribution d'éclairage en courant alternatif monophasé, avec transformateur Gaulard, modifié par Stanley. **Westinghouse** réalise un nombre croissant de ce type d'installation, concurrençant sévèrement le courant continu d'Edison aux États-Unis, car intransportable au-delà du km.

**6** - En 1887, en Allemagne, **Haselwander** fabrique le premier **alternateur- moteur synchrone triphasé** et réalise en 1888 à Offenbourg, un court transport de force en triphasé.

**7** - **Ferranti** construit en 1888/89 à **Deptford**, à côté de Londres, une centrale géante pour l'éclairage, avec des machines 20 fois plus puissantes que celles de l'époque, produisant du courant alternatif monophasé, transformé à **10 000 volts**, transporté à 12 km, puis abaissé en 2 fois, à 2400 puis 100 volts.

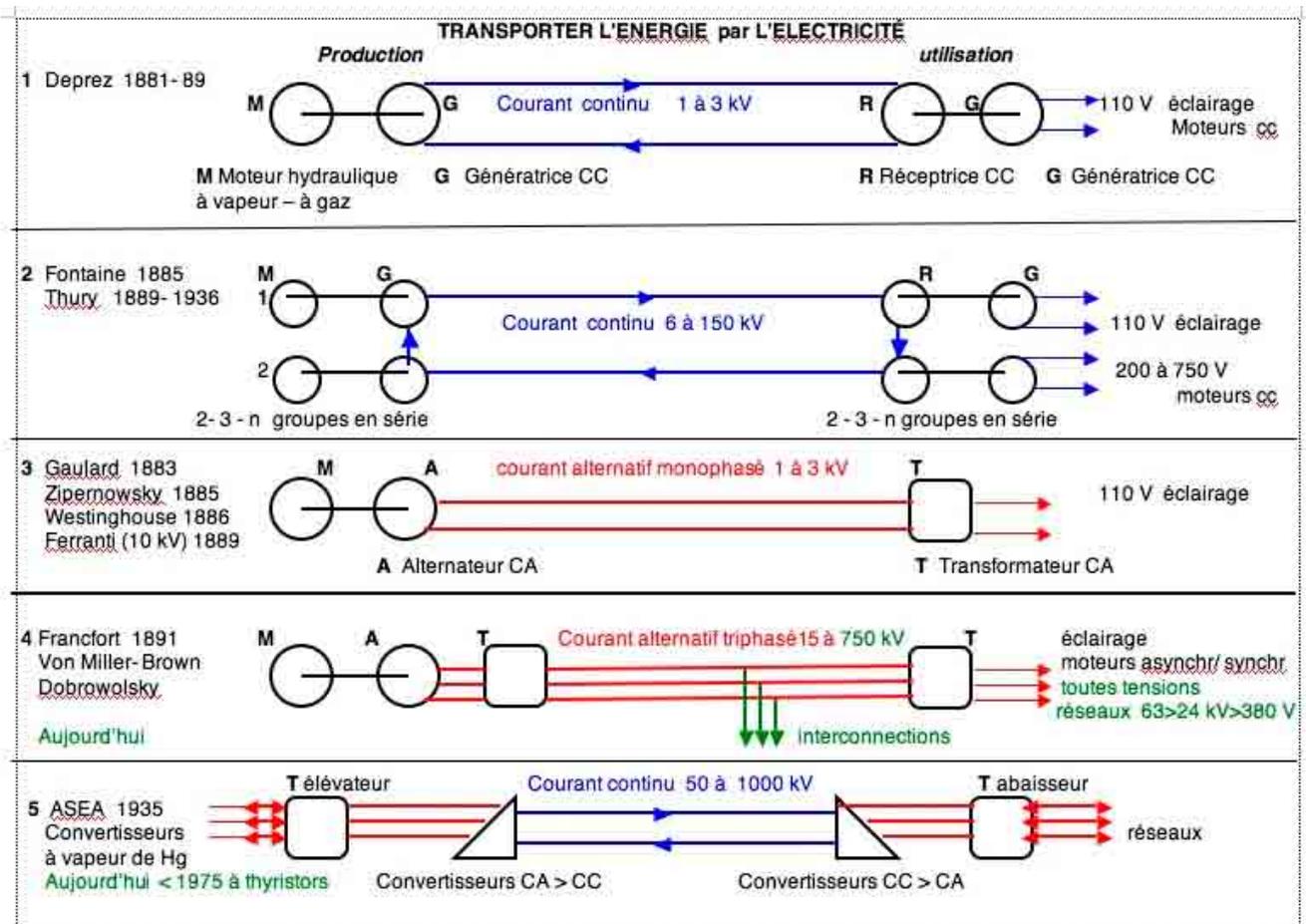
**8** - En Italie, en mars 1888, **Ferraris** présente des modèles de moteurs plus évolués et publie ses travaux sur des **moteurs biphasés** à induits massifs. Il autorise Westinghouse à les construire librement, sans redevance.

**9** - En Amérique, les **brevets de Tesla** déposés en octobre 1887, accordés et publiés en mai 1888 décrivent plusieurs variantes de **moteurs synchrones et asynchrones** en alternatif biphasé. Ils sont achetés en juillet par Westinghouse, mais ne seront fabriqués qu'après 1892.

**10** - fin 1888/ 1889 **Dolivo Dobrowolsky de l'AEG** construit le premier **moteur triphasé** à cage d'écureuil de 5 PS, d'après le concept du *champ tournant* de Ferraris.

**11** - janvier 1891, **Brown** fait à **Oerlikon** des essais de transport sur 8 Km, sous les tensions de 20 à **30 kV**, par fils aériens nus sur isolateurs.

**12** - août 1891, les ingénieurs d'AEG et Oerlikon, **von Miller, Rathenau, Dolivo Dobrowolsky, Brown** réalisent un transport en alternatif triphasé sous **15 kV à 175 Km**, de Lauffen à Francfort, d'une puissance de **300 PS**, au départ. Avec un rendement de **75 %**, il alimente à l'exposition de Frankfurt am Main divers récepteurs, dont un moteur asynchrone à cage de **100 PS**. L'installation est ensuite testée jusqu'à **30 kV**.



La démonstration finale du transport de la Force électrique en **1891** reste l'une des grandes dates de la maîtrise de l'électricité. C'était la troisième expérience, après Munich et Grenoble où l'électricité recréait à l'arrivée une cascade, symbolisant le transport de l'énergie hydraulique enfin résolu par l'association de l'hydraulique avec l'électricité, **l'hydroélectricité**. Quatre ans plus tard, ce sera l'équipement de la plus grande cascade du monde connu, le Niagara. (IV-4)

Les bases théoriques et les matériels du transport d'énergie électrique à distance sont enfin définis et validés par l'expérience de Francfort, la plus spectaculaire des années 1880-1891. Ils vont maintenant s'améliorer et se développer jusqu'au niveau de perfection actuel. La route était tracée pour entreprendre l'escalade des tensions de transport en alternatif jusqu'à 750 kV en 1965. Le transport en continu subsistera pour des cas particuliers et franchira la barre des 1000 kV (IV-4).

### **Du continu à l'alternatif, mutation ou rupture**

L'histoire de la résolution pas à pas de ce complexe transport de l'énergie par l'électricité est un bon exemple pour comprendre la lente et hésitante progression de l'intelligence humaine vers les découvertes ou inventions, à l'origine des révolutions techniques.

Néanmoins, il est surprenant que cette émergence d'une nouvelle électricité de nature oscillante, non plus continue, ait suscité chez les spécialistes autant de réticences psychologiques, que de difficultés techniques.

En dehors des opposants pour motifs personnels, tel Deprez ou Edison, ce sont en général des hommes âgés, de compétence et d'expérience indiscutable, William Thomson et Crompton en Angleterre ou Werner Siemens en Allemagne qui se sont trouvés en position de conservateurs de la tradition du courant continu. En face des aventuriers intellectuels un peu révolutionnaires étaient en majorité des jeunes trentenaires, les Gaulard, Ferranti, Hopkinson, Tesla, E. Thomson, Brown, Dolivo Dobrowolsky.

René Taton, chercheur au CNRS, notait dans son étude sur les *causalités et accidents de la découverte scientifique* : « *qu'il est toujours dangereux de conférer des pouvoirs d'appréciation trop étendus à des scientifiques ou industriels, même de grande valeur, car leurs théories se transforment, parfois avec l'âge, en dogmes intangibles, contre lesquels ils n'admettent pas de critique.* »

Scientifiques et politiques devraient en tenir compte.

Le monde des électriciens s'est ainsi retrouvé devant une mutation fondamentale de sa base scientifique, que les esprits jeunes perçoivent mieux que les savants âgés, dont la grande expérience du connu semble faire écran à la perception de l'inconnu.

Une rupture comparable s'était déjà produite en 1800, au passage de l'électrostatique à l'électrodynamique, mais dans un cercle très restreint de quelques dizaines de physiciens. Cette fois, cela concernait des milliers d'électriciens. Peu après, une autre rupture se produira, mais avec moins de conséquences directes, entre l'électricité à basse fréquence et celle haute fréquence, puis les ondes électromagnétiques générées avec ces hautes fréquences. (29).

Dans d'autres domaines de la physique, Einstein, découvreur de la relativité dans l'infiniment grand, ne comprenait pas la nouvelle théorie quantique que ses jeunes successeurs découvraient pour mieux comprendre l'infiniment petit.

Dix années (1881-1891) auront été ainsi nécessaires pour que l'électricité effectue ce nouveau bond, entrant ainsi dans l'âge adulte. Et pourtant les éléments comme le générateur et le transformateur étaient potentiellement connus. L'objectif n'impliquait pas de découverte fondamentale, seulement la compréhension mathématique et pratique de l'électricité oscillante, l'invention difficile d'un nouveau moteur, d'expériences judicieuses, résultant d'une réflexion collective d'hommes de tous pays, chacun apportant sa pierre à l'édifice, avec les inévitables controverses, sources de progrès.

Parmi ces hommes, c'étaient : en France, Fontaine, Deprez, Gaulard - en Italie Ferraris - en Autriche-Hongrie, le trio ZDB - en Allemagne, Haselwander, von Miller, Rathenau, von Dolivo Dobrowolsky - En suisse Brown - en Suède Wenström - en Angleterre, W. Thomson, Ferranti, Hopkinson - aux États-Unis, E. Thomson, Westinghouse, Tesla, Stanley, en oubliant comme d'habitude les dizaines de collaborateurs et collègues inconnus sans lesquels ces pionniers n'auraient pas réussi leurs défis.

Si le prix Nobel avait existé, il aurait été bien difficile d'en trouver le ou les trois principaux acteurs. D'ailleurs un super-prix Nobel s'imposait, tant ce transport de l'énergie par l'électricité sous cette nouvelle forme, l'alternatif, va bouleverser le monde.

### **Transporter l'énergie électrique sans fil**

Dans la dernière décennie du XIX<sup>e</sup> siècle, ce rêve insolite a hanté un esprit scientifique, mais à l'imagination un peu trop débordante, Nikola Tesla. Il ne s'agissait pas comme quelques-uns l'ont mal compris, d'utiliser les ondes hertziennes, à peine découvertes, mais des courants alternatifs à très hautes fréquence et tension générées par un transformateur particulier qu'avait imaginé Tesla pour un autre usage, la lumière.

Deux conducteurs auraient suffi, l'un était la terre, l'autre les hautes couches de l'atmosphère, conductrices pour ces fréquences et tensions. Il prit des brevets, mena des essais spectaculaires et dépensa largement l'argent d'un banquier pour un résultat nul, sinon les exaltations des amateurs de science-fiction (IV-4).

Son transformateur résonant générateur de courants à hautes fréquences, fut cependant un outil apprécié pour d'autres applications, en particulier les débuts de la TSF et la thérapie.

Néanmoins, les ondes sont bien capables de transporter l'énergie en quantité, puisque celles du spectre visible transportent sur terre une partie de la phénoménale énergie du soleil, et que le four à micro-ondes réchauffe nos aliments humides grâce au magnétron du radar.

### **Épilogue**

Pour le célèbre vulgarisateur, Louis Figuiet, la décennie 1880 préfigurait un **âge d'or** :

*« Pendant notre siècle, la machine à vapeur, en abaissant le prix de chaque chose, a opéré dans l'industrie une révolution absolue. Mais le moteur à vapeur peut être détrôné... Les torrents qui tombent des montagnes sont une force immense, qui ne profite à rien ; les marées soulèvent inutilement des masses liquides sur toutes les côtes du globe ; les agitations de l'atmosphère pourraient utilement être adaptées à des machines motrices. On pourrait utiliser la pesanteur sous une autre forme encore que celle des chutes d'eau.*

*C'est l'électricité qui, recueillant ces énergies perdues, peut, au moyen d'un fil conducteur assez mince pour passer par le trou d'une serrure, faire voyager la force mécanique presque à toute distance...*

*L'âge d'or, rêvé par l'imagination des poètes, sera réalisé par le génie des savants. »*

*Les nouvelles conquêtes de la science - 1883*

Trente ans plus tard, tous ces progrès vers l'âge d'or permettaient aussi à une grande partie de l'humanité de perfectionner son irrésistible penchant pour tuer sa propre espèce par la guerre, en déclenchant la première mondiale, prélude à une deuxième, à l'origine de grandes avancées scientifiques et techniques, avec ses 60 millions de morts.

La troisième a été évitée jusqu'ici, non par la sagesse des hommes mais leur peur, précisément devant le grand bond scientifique et technique de leur maîtrise encore débutante des forces et puissantes énergies du noyau atomique. Ce serait par trop provocateur que de remercier pour cela les scientifiques, inventeurs de la bombe — certains en ont eu honte.

## Compléments

**1** - Thème développé au colloque *Hydraulique des millénaires*, Centenaire de la Houille blanche, 2002 : ANDRÉ DUCLUZAU, *Transporter l'énergie hydraulique à distance, avant l'électricité (1830-1890)*, La Houille blanche, Revue internationale de l'eau, SHF, n°4/5 2002. Revue de l'Electricité et de l'Electronique, REE 4/2003.

**2 - Houille blanche** - Cette belle analogie est la traduction du discours de Cavour au parlement de Turin le 19 juin 1854 pour obtenir les crédits nécessaires au percement du premier tunnel sous les Alpes (12 km) : « ...avec *il carbone bianco eterno*, nous avons en chutes d'eau plus de force motrice que l'Angleterre dans toutes ses mines de charbon... »

Plus tardivement, elle fut reprise par **Aristide Berges**, papetier en Dauphiné et fit l'objet d'un document vantant la houille blanche, qu'il présentait sur son stand à l'exposition de Paris en 1889. D'autres ont proposé ensuite, mais sans le même succès, la houille bleue de la mer, la houille verte des rivières de plaine.

ANDRÉ DUCLUZAU, *La Houille blanche de Belledonne à la Romanche, Aristide Bergès du mythe à la réalité*, ed. Belledonne, Librairie des Alpes, Grenoble, 1998.

**3** - La **conférence d'AYRTON**, *The electric transmission of mechanical Power* a paru dans *Electrician* du 30/8/79 et résumée par E. Hospitalier dans *La lumière électrique* de 1879, p.167. Il conclut : « *M. Ayrton croit qu'il faut attendre au siècle prochain pour que l'idée de la distribution de la force motrice par l'électricité se réalise. Est-ce que les vingt années qui nous en séparent ne suffisent pas pour résoudre la question ?... Après avoir canalisé la lumière et la chaleur par le gaz, la pensée par les fils télégraphiques et les tubes pneumatiques, la parole par les conducteurs téléphoniques, ne pouvons-nous pas achever l'œuvre en distribuant l'électricité qui amènera chez nous la force motrice, cet élément indispensable au travail. M. Ayrton a été trop réservé. Le progrès marche à pas de géant et les découvertes qui se succèdent si rapidement depuis quelques années nous montrent qu'oser c'est pouvoir. Qui osera le premier ?* »

Deprez fut l'un des premiers. Hospitalier n'incluait pas encore dans son dithyrambe, l'intrusion deux ans plus tard de la lumière électrique chez lui.

**4 - Lebon** a ainsi enrichi le bêtisier des *Vérités scientifiques*. Encore aujourd'hui, accoler l'attribut *scientifique* est parfois une fausse garantie de vérité, il sert souvent à masquer l'absence de preuve d'une affirmation.

**5** - Ce **marteau-pilon** était un prototype original. Il est probable qu'un seul exemplaire a été construit, celui présenté est au Musée Ampère de Poleymieux. Description dans *La Nature*, 1882/2, p.133/134. (cnum.cnam.fr)

**6 - L'énergie électrique**, accessible sur URL cnum.cnam.fr *La Lumière électrique*, 1e série, vol 11, p.67. Cette revue a publié 37 articles sur les expériences et thèses de Deprez.

**7** - FRANK GERALDY - *Courants continus haute tension*, *Lumière électrique*, 1890, n° 38, p.128/132.

**8** - Ce **rapport de M. LÉVY** figure dans *La lumière électrique*, n° 52, 25/12/1886, p.577/592.

**9** - E. BOISTEL, ed. Georges Carré, Paris, 1887. *La Vérité sur les expériences de Creil* - Extraits :

« ...les insuccès rencontrés ont tous la même cause : une complète inexpérience dans la conception et une étude insuffisante dans la construction des machines, jointes à une exécution vicieuse ou trop imparfaite des anneaux et inducteurs de la génératrice et de la réceptrice...En remplaçant, dans sa machine Gramme modifiée, l'anneau unique par deux anneaux groupés en série...c'est un moyen indirect de réunir en une seule deux génératrices en tension. Mais, en opérant ainsi, M. Deprez n'a pas vu qu'il commettait un contresens magnétique en ce qu'il doublait l'entrefer- d'où le mauvais coefficient économique de ses machines ». (rendement)

...la théorie des solénoïdes appliquée par Gramme, Siemens, Edison, incite à utiliser des gros électros inducteurs en petit nombre, plutôt que l'inverse comme l'a fait Deprez.

...l'isolation des fils aériens est une erreur, surtout si cet isolement est mauvais.

Les similitudes : « *si l'on compare la machine de M. Deprez à une machine qui s'en rapproche le plus, celle d'Edison-Hopkinson de 50 ch on trouve que celle-ci, pour la production d'un champ magnétique presque triple ne consomme que 2% de la puissance totale, 18 fois moins que celle de Creil...De même pour le cuivre, la génératrice de M. Deprez exige, à puissance égale, 24 fois autant de cuivre que la machine Edison Hopkinson. ...Le rendement de la génératrice est de 72% seulement, au lieu de 90/91% que rendent les bonnes machines actuelles* ».

Boistel avait été le conseil privilégié d'Edison lors de son implantation en France, en raison de ses compétences et de sa bonne connaissance de l'anglais. Il a traduit plusieurs ouvrages techniques.

**10- Deprez** avait publié dans *La lumière électrique*, une étude sur la construction des machines où il montrait l'intérêt de l'étude de la *courbe caractéristique*. Il a édité en 1896, en tant que professeur d'électricité industrielle au Conservatoire national des Arts et Métiers, un *Traité d'électricité industrielle, théorique et pratique* de 553 p.

En 1935, à l'occasion du cinquantenaire des expériences Deprez et Gaulard, la Revue générale d'électricité a publié un très long article sur Deprez (43 p.- 841/884) suivi d'un autre, court, sur Gaulard (7 p. 885/892). L'article sur Deprez est suivi d'une bibliographie de 112 titres sur ses travaux.

*Célébration du cinquantenaire des expériences de Marcel Deprez et des travaux de Lucien Gaulard (1885/1935)* - Revue générale d'électricité T. XXXVIII, n° 25, 21/12/1935, p.876/892.

**11a** - Ce rejet d'une innovation par une autorité scientifique est un phénomène assez classique. Quelques années auparavant, en 1879, il y eu un rejet semblable par la Royal Society de la découverte par Hughes d'un phénomène étrange, provoqué par des ondes électromagnétiques alors inconnues (V-3).

**11 b** - La dénomination des **transfos de Gaulard** en types 1 - 2 - 3 - 4 n'a été ajouté que pour faciliter le repérage de chaque variante, Gaulard ne cessant d'améliorer ses appareils.

**12** - Les **éclairages** installés dans les sites étaient :

À l'exposition, 9 lampes Swan, 9 Berstein, 1 lampe soleil. À Turin, 34 Edison de 16 bougies, 48 de 10 b, 1 arc Siemens. À Venaria, 2 arcs Siemens. À Lanzo, 16 Swan, 9 Berstein, 1 soleil, 2 arcs Siemens.

**13** - Mémoire de **Ferraris**, cnum.cnam.fr - *La Lumière électrique*, T.16, n°22, 30/5/1885, p.397. N° 23, p.460. n°25 p.551, n°26 p.602.

**14 - mesures** - L'invention des appareils de mesure n'est pas traitée dans ce livre, comme d'autres auxiliaires et applications électriques, l'appareillage, les câbles etc. Elle avait déjà fait l'objet d'un fascicule. Se reporter à : ANDRÉ DUCLUZAUX - *La mesure électrique au temps des pionniers*, Revue générale de l'Electricité, RGE n° 10, nov 1990.

**15** - Plus la **fréquence** est élevée, plus la masse de fer est réduite, dans toutes machines. Pour cette raison essentiellement, les réseaux électriques à bord des avions sont à 400 Hz. Un autre avantage s'y ajoute, le redressement pour l'appareillage électronique en courant continu génère moins d'harmoniques à filtrer.

**16** - L'*accouplement* ou montage *série ou parallèle*, dénomination actuelle, était en *tension ou en quantité* à l'époque. Pour être mieux compris, les vulgarisateurs comparaient parfois ces montages à un attelage de chevaux *en file ou de front*.

**17** - Le **modèle 1 de Ferraris**, comme les suivants 3 et 4, sont des reproductions, dont l'original a brûlé le 8/7/1899, dans l'incendie de l'exposition à Côme pour le centenaire de l'électricité. Ils ont été reconstitués exactement, à l'initiative du professeur Guido Grassi, par le même artisan qui avait fait

l'original en 1885, et sont déposés avec les autres maquettes de 1888 à l'*Instituto Nazionale Electrotecnico Galileo Ferraris* de Turin.

La photo (zk) est celle d'une copie, présentée au Deutsches Museum.

**18-** Article suivi d'une intéressante bibliographie sur le **transformateur** :

A. ALACSY ET G. FUCHS, *Transformer invented 75 Years ago*, AIEE Transactions, juin 1961.

**19** - REYNOLDS T. S. A. BERNSTEIN T., *The Damnable Alternating Current*, Proceedings of IEEE, vol.64, N° 9, sept 1976, p.1339/1343.

Plusieurs articles dans *Electrical World* et *Electrical Engineer* de 1888

**20** - La **dangerosité de l'alternatif** par rapport au continu n'est pas un simple rapport de tension de 5, plutôt de 2 ou 3, mais dépend d'autres facteurs. Le continu provoque un choc plus important au début et à la fin, choc qui sera répété à la fréquence de l'alternatif. Il en résulte une contraction musculaire pouvant empêcher l'électrisé de lâcher l'outil ou l'objet sous tension qu'il tient. Le danger s'accroît avec la fréquence, mais disparaît avec les très hautes fréquences de centaines de kHz, phénomène qu'a exploité Tesla pour étonner avec l'éclairage de lampes presque sans fils.

**21** - Il fut reconnu plus tard que c'était l'inverse, la **circulation dans le sol de courants continus** parasites, mêmes faibles, peuvent être néfaste par la lente corrosion électrolytique qu'elle provoque sur toutes les tuyauteries enterrées, eau, gaz, électricité.

**22-** En 1903, **Edison** a fait filmer une courte séquence où il fait électrocuter un éléphant. En général, les animaux sont d'autant plus sensibles à l'électrocution qu'ils sont gros. Le cheval, la vache sont plus sensibles que l'homme. Pour les insectes, il faut par contre plus de 1000 volts.

**23** - Texte de la lecture de **Tesla** à l'AIEE, publié dans : AIEE Transactions, New York, vol 5, (1888), p.305 et *Electrical World*, 2/6/1888, p. 281.

**25** - **Edison**, qui refusait l'alternatif contre toute évidence, avait été éliminé avant 1889 de la direction effective de ses sociétés par les banquiers. Lors de son passage à Paris, s'il avait visité la filiale d'Ivry, il aurait bondi en y constatant la fabrication d'un transformateur sous licence ZDB. L'un de ces transformateurs (xz2), honni d'Edison, portant la plaque Edison d'Ivry, faisait partie de la collection de matériels anciens conservés à l'IEG, École des Ingénieurs Electriciens de Grenoble, et transférés en 1990 au Musée Ampère de Poleymieux, près de Lyon.



xz2 Transfo Edison - Ivry - 1890

**26** - Malgré son retentissement dans le monde, **l'expérience de Francfort fut et reste encore aujourd'hui peu connue en France**, suite à l'importance minimum que lui donna *La Lumière électrique*. Elle n'osait pas trop reconnaître le succès définitif de ce courant alternatif qu'elle avait tant décrié pendant des années. Pas de reportage de journaliste, ni gravure, deux de ses articles étaient même critiques. Ceci, malgré la présence de Marcel Deprez, invité à Francfort.

Par contre, *La Nature* envoya Hospitalier et publia trois articles en 1991/92.

On trouve de nombreux articles de revues allemandes ou suisses d'époque, ou à l'occasion des 50 ou 75 ans :

Bulletin Oerlikon, N°232, 8/1941, *50 Jahre Drehstromübertragung*

Elektro Anzeiger, Essen, Nr 24-21/12/1966.

AEG-Mitteilungen 56, (1966) 5, *Drehstrom-Freileitungen vor 75 Jahre und heute*.

ETZ-A Bd 87, (1966), H.24, *75 Jahre Drehstromübertragung Lauffen-Frankfurt a. M.*

HERMANN LANZKE, *Er nannte ihn Drehstrom*.

**27 – L'appareillage électrique** a pour fonctions indispensables, d'abord d'assurer le contrôle-commande de la circulation normale de l'électricité dans tout élément des réseaux du producteur au consommateur. Ensuite de protéger rapidement ces éléments contre les dysfonctionnements et courts-circuits, ainsi que tous les récepteurs, transformateurs et générateurs.

L'appareillage fut le matériel électrique qui nécessita le temps le plus long, plus d'un demi siècle, pour arriver à une conception satisfaisante par différents procédés de coupure complexes donnant des résultats technico-économiques proches. Le principal problème est la coupure de courants pouvant atteindre, en moins de 1/100 de sec, des valeurs très élevées, dizaines de milliers à plus de 100 000 ampères, avec l'arc utile mais aussi destructeur qui se manifeste à la séparation des contacts.

**28 - Ferraris, père du triphasé**, alors qu'il n'avait envisagé que le biphasé. Il est possible qu'il s'agisse simplement d'une erreur de traducteur.

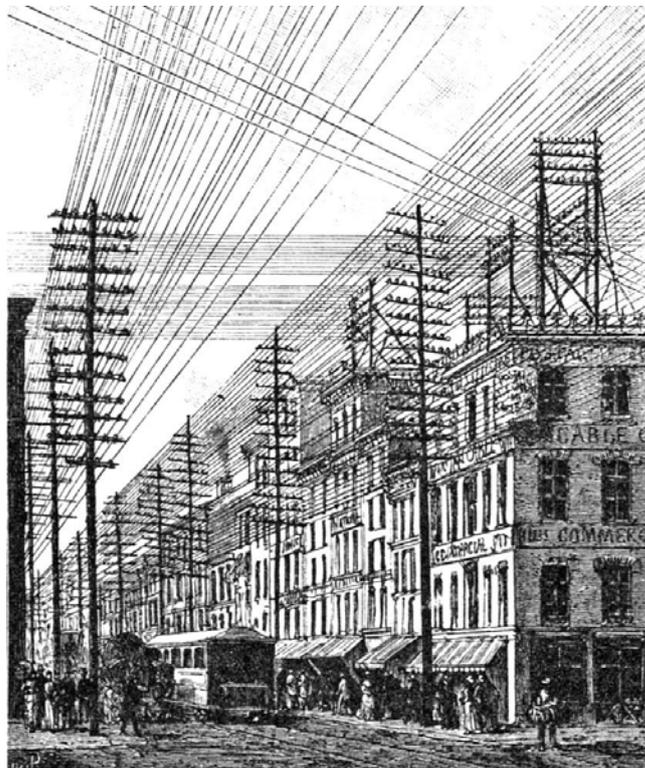
**29 -** Cette mutation, rupture ou **changement des repères fondamentaux** se produit parfois dans toutes les sciences : En optique, entre la nature corpusculaire ou ondulatoire de la lumière ; en physique entre la mécanique newtonienne et relativiste ; puis un peu plus tard, entre la relativité et la probabilité quantique, qu'Einstein n'arrivait pas à admettre contre ses collègues plus jeunes, Pauli et Heisenberg.

On la retrouvera en radiotechnique dans les années 1960/70 où tous les circuits d'amplification en tension, basés sur l'emploi des tubes à vide, ont été remplacés par des circuits à amplification de courant à basse tension, utilisant des composants solides à semi-conducteurs.

Dans les années 1990, se produisit une autre révolution fondamentale amorcée par le *Personal Computer* (PC), le remplacement du signal analogique en signal numérique ou digital dans toute l'électronique et la radiotechnique, sans lequel le téléphone portable serait resté très limité.

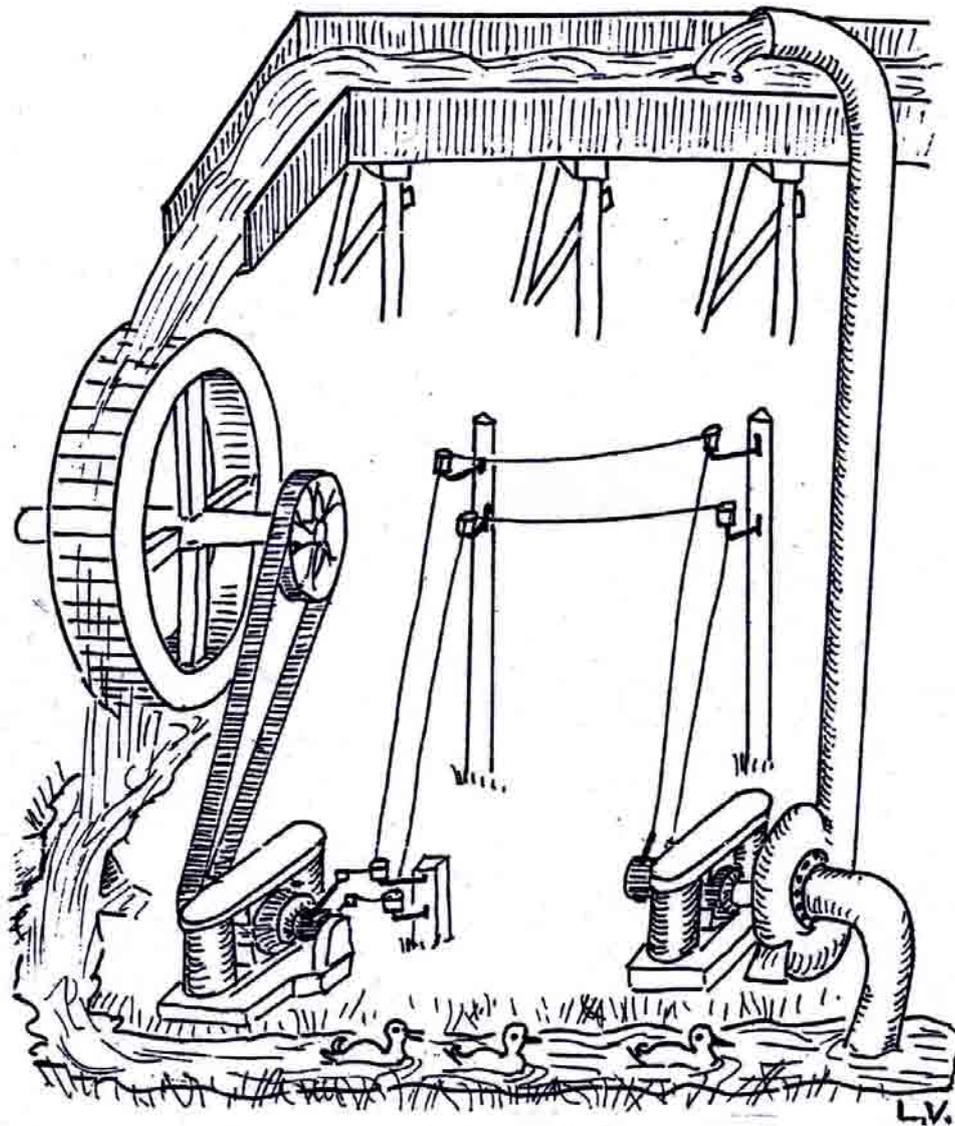
Le grand public ne perçoit ces ruptures qu'après. Par contre elles provoquent des remises en question pour les spécialistes impliqués.

**30 - Le maser** est une variante du laser, générant des ondes électromagnétiques de longueur d'onde différente de celles de la lumière. Il a d'ailleurs été découvert un peu avant le laser.



xd Fils aériens à Philadelphie - Chestnut street

## Houille blanche et Transport de force ou le Mouvement perpétuel

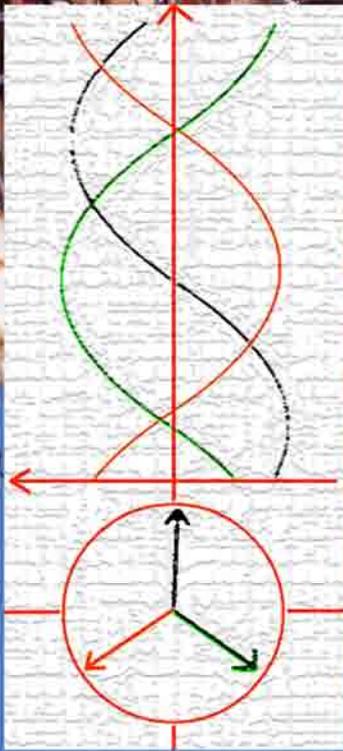
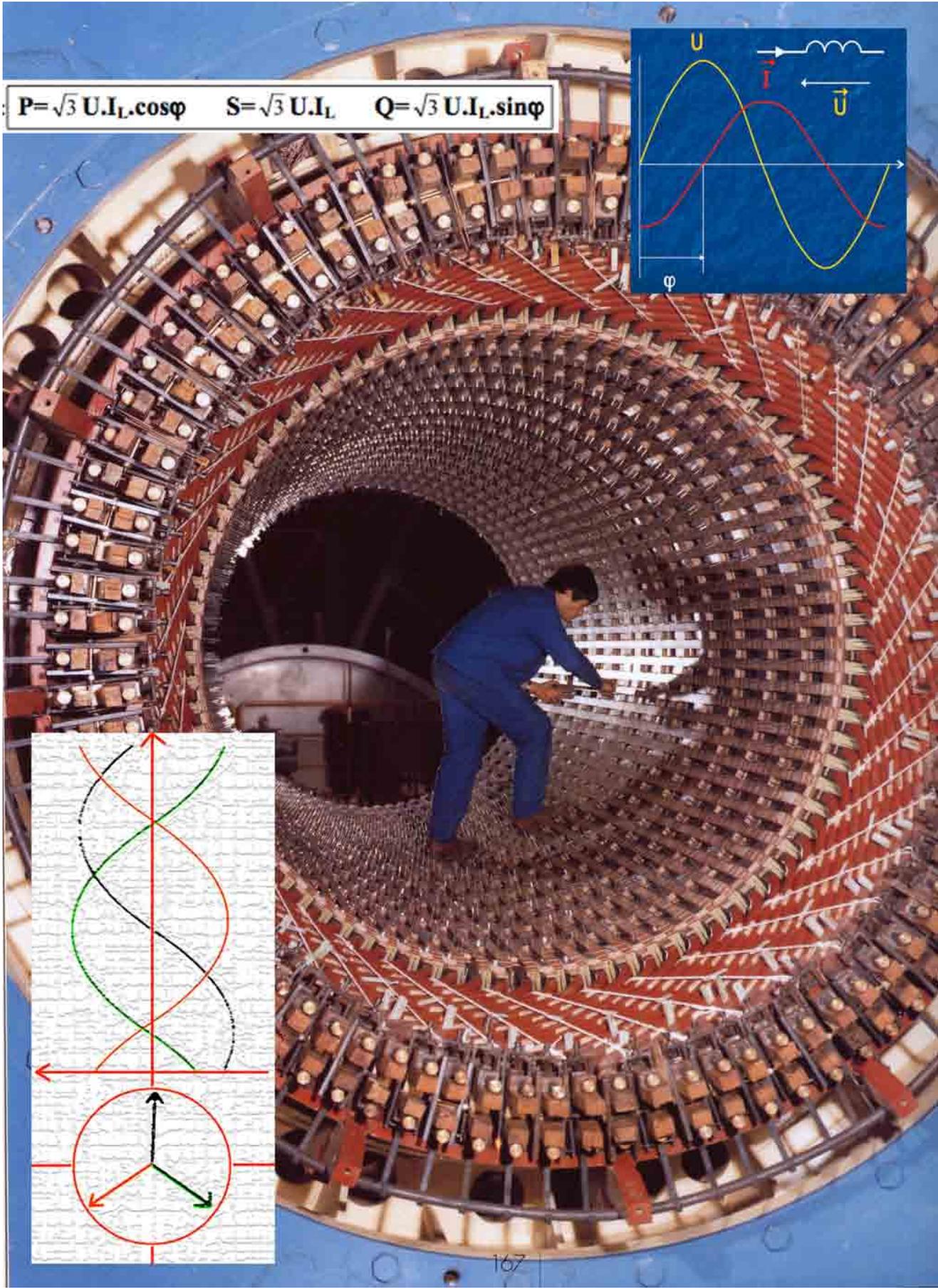
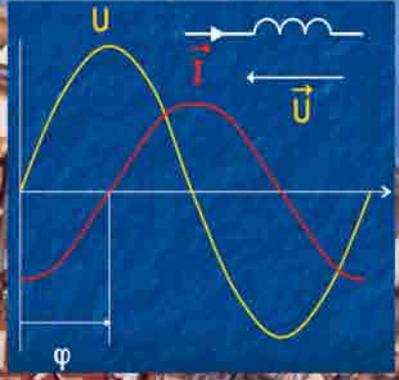


par L.VADOT  
Professeur d'Hydraulique Supérieure  
à l'Université d'Aqua-fontis

XZZ

Dessin destiné au livre sur l'histoire de l'hydraulique que Louis Vadot n'a pu achever. Ingénieur hydraulicien discret, il avait contribué à la conception du premier groupe bulbe, pour la Rance. Docteur en biologie, il avait mis au point les pompes pour le premier cœur artificiel. Il aimait faire comprendre science et techniques aux enfants, et conçut en 1986, une exposition visitée par 6000 scolaires au musée de la Houille blanche : Deux mille ans d'hydraulique de Vitruve à Grand'Maison.

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos\varphi \quad S = \sqrt{3} U_L I_L \quad Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin\varphi$$



## **3 – L’alternatif, nouveau vecteur d’énergie**

### **Théorie et machines**

En quelques années à partir de 1890, le système électrique, progressivement édifié en 80 ans sur le courant continu, devait être fondamentalement réadapté à l’alternatif, pour lequel les particularités et les calculs étaient plus complexes, et les machines différentes.

Les électriciens abordaient là un nouveau monde scientifique et technique.

Il faut souligner que si l’alternatif n’a pas remplacé le continu, il a créé un nouveau vecteur d’énergie électrique, bien adapté au problème du transport à distance et à la distribution, qui nécessitent de multiples changements de tensions – ce que le continu était presque incapable de faire.

#### **Domaines réservés du courant continu**

Les machines en courant continu, soit statiques comme la pile et l’accumulateur, soit rotatives comme la dynamo, à la fois générateur et moteur, vont continuer à être exploités dans les domaines où l’alternatif ne pouvait pas les remplacer.

La pile et l’accumulateur évolueront comme le relate le chapitre III-1.

La dynamo génératrice évoluera peu, sinon en puissance pour les besoins importants de l’électrochimie, de la locomotion, de la charge des accumulateurs, jusqu’à son remplacement progressif par les redresseurs d’alternatif en continu puis par les convertisseurs à semi-conducteurs de puissance.

La dynamo en moteur à excitation shunt réglable s’imposera dans toutes les applications nécessitant une vitesse variable. Le moteur à excitation série restera longtemps le roi pour la traction, grâce à son très fort couple de démarrage. Mais tous deux seront progressivement remplacés par des moteurs en alternatif, lorsque les régulateurs à semi-conducteurs se généraliseront dans les années 1980.

#### **La compréhension de l’électromagnétisme dans les machines progresse**

Les progrès des machines à courant continu, durant les premières années 1870, résultaient uniquement de la méthode empirique, la recherche permanente d’amélioration à partir des résultats plus ou moins bons des modèles précédents. Les contemporains de Gramme progressaient pas à pas avec leur intuition, guidée par une observation réfléchie, ce que les praticiens d’aujourd’hui appellent le « *pifomètre* », l’instrument le plus utilisé des chercheurs de tous les temps, un hybride de l’imagination et du hasard. Leur niveau mathématique ne leur permettait pas d’utiliser les vingt équations différentielles de Maxwell, accessibles depuis 1865 à quelques très rares spécialistes.

Progressivement quelques théoriciens cherchaient à mieux comprendre les phénomènes qui se manifestaient dans les circuits magnétiques et bobinages.

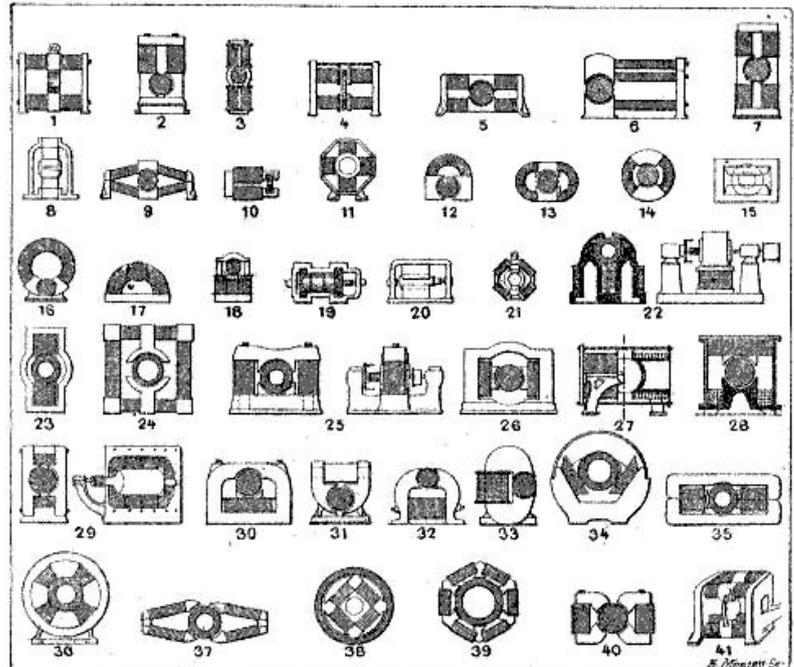
Les progrès résultèrent alors d’une alternance de réflexions théoriques confirmées ou infirmées par leur application pratique — la classique méthode expérimentale. (0)

L'un des premiers en France fut Louis Bréguet, à la fois physicien et praticien ; constructeur des premières petites machines Gramme de 1869. Peu convaincu de leur intérêt, il en découvrit progressivement le comportement et chercha à le comprendre à partir des notions connues d'électromagnétisme. Après 1879, il s'intéressa aux problèmes des différentes machines, Gramme, Alteneck-Siemens à induit à tambour et les autres qui en dérivèrent.

En particulier, ce nécessaire « décalage des balais » par rapport à la ligne neutre théorique pour éviter trop d'étincelles suivant la vitesse et surtout son inversion complète lorsque l'on passait de moteur en générateur. Il découvrit ainsi ce qu'on appela la *réaction d'induit*, résultant de l'inductance propre de l'induit. Elle se révéla plus faible avec les induits à tambour qu'avec ceux à anneau.

Sur un autre plan, Mascart apporta une contribution notable en matière de méthodes de mesure des grandeurs électriques.

En Angleterre ce furent Lord Kelvin et surtout John Hopkinson avec son frère Gérard qui proposèrent des méthodes graphiques pour analyser l'interaction des différents paramètres de fonctionnement des machines : intensité, tension, force électromotrice, rendement, vitesse. Il proposa une méthode de calcul du flux magnétique, par analogie avec la circulation du courant, en introduisant la notion de *réactance d'un circuit magnétique* constitué de fer et d'espaces d'air, analogue à la résistance d'un circuit en électrocinétique.

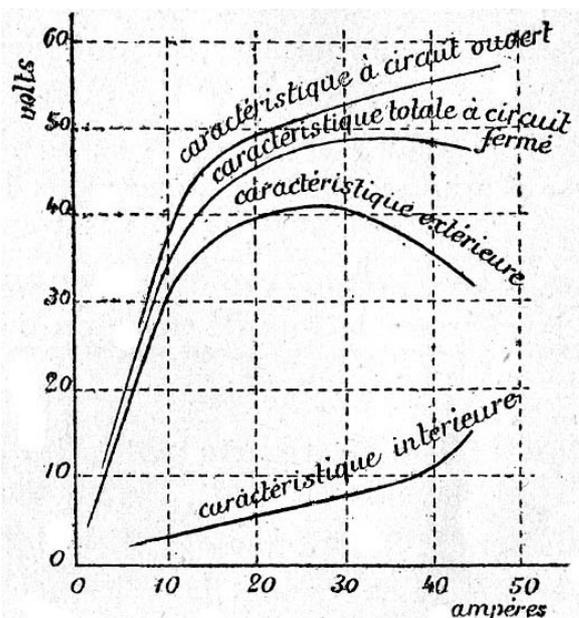


a Formes principales des inducteurs des machines dynamos électriques.

Ainsi apparut la notion de *perméabilité* magnétique et ultérieurement celle de *saturation* des circuits. Cela permit aux constructeurs de calculer les *fuites magnétiques* et d'optimiser les multiples formes de circuits magnétiques qu'ils imaginaient pour leurs machines, une quarantaine (a). Dans sa reprise d'étude complète des machines d'Edison vers 1883, il raccourcit des 2/3 les circuits inducteurs que leur concepteur avait allongé exagérément, croyant augmenter leur effet.

Deprez reprit les méthodes graphiques d'Hopkinson dans sa théorie des dynamos, commencée vers 1884, en les dénommant *caractéristiques*. (b)

La plupart de ces progrès dans la conception des dynamos ont bénéficié simultanément aux alternateurs.



b caractéristiques volt/ampère d'une dynamo

## Comprendre et calculer avec le courant alternatif

Passer de l'électricité, fluide inconnu s'écoulant naturellement dans les circuits comme l'eau dans les conduites suivant l'analogie hydraulique, à une électricité très différente, un fluide changeant de sens une centaine de fois par seconde, imposa une difficile adaptation intellectuelle avec des définitions et des calculs qui demanderont une dizaine d'années (1885/95) aux électriciens, tels Heaviside, Hopkinson en Angleterre, Boucherot, Blondel, Janet, Leblanc en France. (1) Ajoutons que la nature de cette nouvelle électricité était encore plus incompréhensible que la précédente.

Ce dernier écrivait dans une étude de 1891 : « *L'esprit humain conçoit mieux l'action d'un fluide animé d'une vitesse de direction constante... Cependant, les machines d'induction qui sont pour nous, à l'heure actuelle, la seule source d'électricité, fournissent naturellement des courants alternatifs, et il a fallu violenter la nature en quelque sorte, comme a réussi à le faire M. Gramme, pour transformer ces courants en courants continus...* »

Déjà, quelle était la courbe représentative de la **valeur instantanée d'un courant** ou d'une tension en alternatif ? Il était en effet difficile de la visualiser si ce n'est avec le système de Wheatstone à miroirs tournants. Cela ressemblait à une **sinusoïde** pour plusieurs raisons :

– C'était l'image intuitive que prend un phénomène mécanique oscillant tel que les vagues lorsque l'on jette une pierre dans l'eau.

– Les physiciens et mathématiciens comme Fourier ou Fresnel étaient familiers de la sinusoïde des ondes lumineuses. Pour tous les calculs comprenant même des intégrales ou dérivées, la sinusoïde est la forme mathématique la plus simple pour une oscillation.

– La construction graphique de cette courbe est assez facilement comprise par les étudiants (b2). En faisant tourner le rayon d'un cercle, un vecteur A, dans le sens inverse, à la vitesse angulaire  $\omega$ , la valeur instantanée  $a$  (en bleu) de la grandeur sinusoïdale est :

$$a = A \sin \alpha$$

Le temps nécessaire pour faire un tour de cercle est la période

$$T = 2\pi / \omega$$

Par exemple pour la définition de l'intensité, avec  $\alpha = \omega t$

$$I = i \sin \omega t$$

l'angle  $\omega$  fut appelé la *pulsation*, liée à la fréquence  $f$  en Hz

$$T = 1/f \text{ en secondes}$$

et la période par

$$\omega = 2\pi f$$

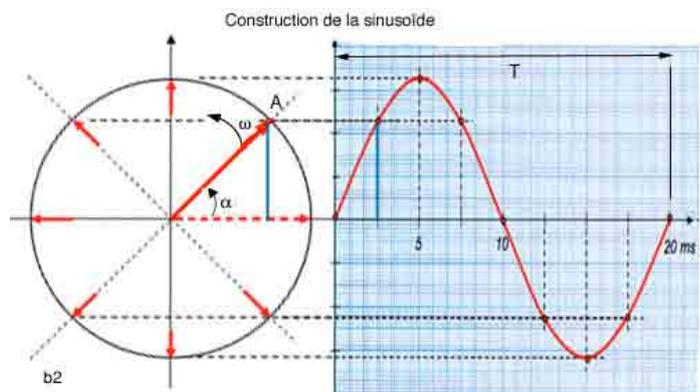
Pour définir sa valeur on pensa utiliser la valeur moyenne, mais elle était nulle sur une période, et pourtant ce courant véhiculait une puissance non nulle. Le congrès de 1889 adopta alors la valeur qui provoquait le même échauffement qu'un courant continu.

Avec la sinusoïde, cela devint la **valeur efficace** :

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

– Les pertes ohmiques dans un réseau par la circulation d'un courant alternatif sont minimales s'il est sinusoïdal. D'ailleurs, s'il ne l'est pas à la source, il le devient progressivement plus on s'en éloigne.

– Lorsque l'on réussit à visualiser tensions et courants avec les oscillographes, c'est sous la *forme naturelle* d'une sinusoïde qu'ils apparaissent, soit dans l'induit de tous les générateurs en continu comme en alternatif, soit dans la décharge oscillante des anciennes machines électrostatiques, d'une bobine de Ruhmkorff, soit la décharge amortie d'un condensateur dans tout circuit comprenant un élément plus inductif que résistif.



L'alternatif amenait nombre de difficultés, de nouvelles grandeurs physiques, souvent rétives à un calcul simple.

Dans les circuits, les deux éléments **inductance et capacité** traversés par de l'alternatif, ne se comportaient plus du tout comme par du continu. L'inductance se constituait comme la résistance, un frein à la circulation du courant ; la capacité était traversé en permanence par le courant alternatif, alors qu'en continu, aucun courant apparent ne la traversait, en régime établi.

Les choses se compliquèrent quand on réalisa que la **loi d'Ohm** ne s'appliquait pas bien si l'inductance était forte (cas des bobinages), comme s'ils ajoutaient une force contre-électromotrice, et de plus ils retardaient le courant par rapport à la tension d'un angle de déphasage  $\varphi$ . Cela se traduisait par une augmentation de la chute de tension normale  $RI$  due à la résistance  $R$ , par une autre chute  $L\omega I$  résultant de l'inductance  $L$ , c'est à dire la réactance  $L\omega$ , sans que cela implique pour autant une perte supplémentaire d'énergie.

**La réactance** est une caractéristique spécifique de tout dipôle électrique qui ne se manifeste qu'en courant alternatif. Ses effets sont analogues à ceux de la résistance en courant continu, c'est-à-dire une chute de tension proportionnelle au courant traversant  $I$ , mais n'entraînant par contre aucune perte d'énergie. La réactance résulte de la circulation permanente d'énergie dans toute *inductance*  $L$  (ch. II-3) : accumulation quand le courant instantané croît, renvoi à la source quand le courant décroît, ceci deux fois par période d'alternance, à la *fréquence*  $f$  du courant, 50 ou 60 Hz par sec.

Comme  $f = 2 \pi \omega$ ,  $\omega$  étant la *pulsation*, la réactance vaut  $L\omega$ . Elle provoque une chute de tension de valeur  $L\omega I$ , élevée dans les bobinages, naturellement à forte inductance, surtout s'ils sont enroulés sur un noyau de fer.

Il devint alors nécessaire dans la loi d'Ohm, de remplacer la résistance par une autre grandeur intégrant à la fois la résistance et la réactance des bobinages, Joubert la dénomma *résistance apparente*, terme remplacé ensuite par l'**impédance** (2)

$$Z = \sqrt{R^2 + (L^2 \omega^2)}$$

Le **déphasage**  $\varphi$  avait beaucoup perturbé les mesures de puissance dans les premières expériences de Turin et de Francfort. On comprit progressivement qu'il y avait une *puissance apparente*  $P = U \cdot I$ , exprimée en VA, des volts x ampères, plus élevée que la *puissance active* en watts qu'il fallait multiplier par le *facteur de puissance*  $\cos\varphi$ , inférieur à 1 :  $P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$

On savait qu'en courant continu, le courant à la mise sous tension d'une bobine ne s'établissait pas instantanément, de même à la coupure, il décroissait progressivement par le canal d'un arc temporaire, l'extra-courant de rupture de Faraday. Longtemps on ignora que cela correspondait à une accumulation d'énergie dans l'inductance par le courant, puis à sa dissipation en chaleur à la coupure. En alternatif, un va et vient permanent de charge et décharge était véhiculé par ce courant déphasé de  $90^\circ$ , dit *réactif*, qui dans les bobinages, se superposait au courant normal, dit *actif*.

Par le calcul et par le raisonnement s'établit lentement la conclusion que ce courant résultait d'un échange alternatif et permanent d'une énergie entre le générateur et l'inductance d'utilisation, l'**énergie réactive**. Bien que dans ce transport la même quantité d'énergie se retrouvât alternativement dans le générateur et l'inductance il en résultait une perte d'énergie, par le simple fait que la circulation de ce courant *réactif*, appelé parfois *déwatté*, entraînait des pertes réelles ohmiques, actives, dans les résistances des circuits qu'il traversait.

Certains le considèrent alors comme un courant parasite. Pas vraiment, répondaient d'autres, car indispensable, il sert à « magnétiser » les bobinages des machines. C'est le courant *magnétisant* d'un transformateur à vide, ou le courant continu d'excitation du générateur.

D'autre part le condensateur, ce composant qui n'était parcouru par aucun courant continu après avoir été chargé un court instant, se trouvait parcouru en permanence par le courant alternatif. On découvrit que si l'on installait des condensateurs en dérivation, près d'un bobinage inductif, ceux-ci

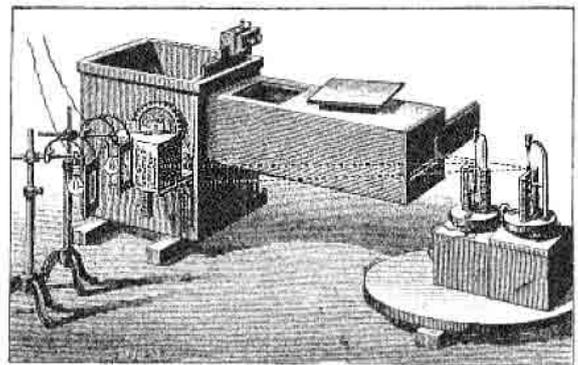
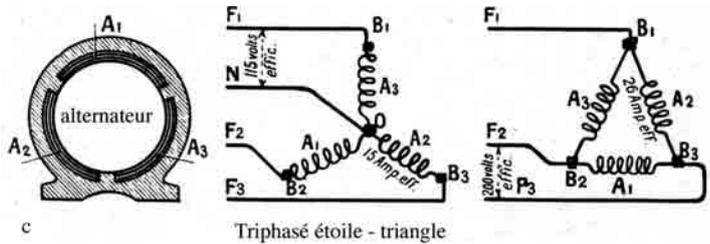
généraient aussi un courant dit *capacitif*, déphasé de 90° par rapport à la tension, mais en avance, l’inverse du courant inductif, en arrière. Si ces deux courants étaient égaux, ils s’annulaient, la source ne fournissait plus que le courant actif. Restait uniquement un courant d’échange d’énergie entre le condensateur et l’inductance. Montage devenu banal, qualifié de *compensation de l’énergie réactive*.

L’**accumulation d’énergie** dans l’espace environnant, d’une inductance,  $\frac{1}{2} Li^2$  air ou fer, définie par sa *perméabilité* au champ magnétique, a été l’obstacle qui a tant retardé la mise au point de la machine à courant continu par les étincelles destructrices de commutateurs-collecteurs a été révélée en 1892 par Heaviside, qui en a déduit en plus la nécessité de placer des self sur les câbles téléphoniques.

L’accumulation d’énergie  $\frac{1}{2} CU^2$  dans une capacité résultait du courant de *déplacement* proposé par Maxwell en 1863, pour expliquer la propriété des isolants soumis à un champ électrique, exprimée par la permittivité diélectrique.

Ces deux propriétés jusque dans les années 1890 étaient restées intuitives, l’avènement du courant alternatif a amplifié leur importance avec le concept d’énergie réactive.

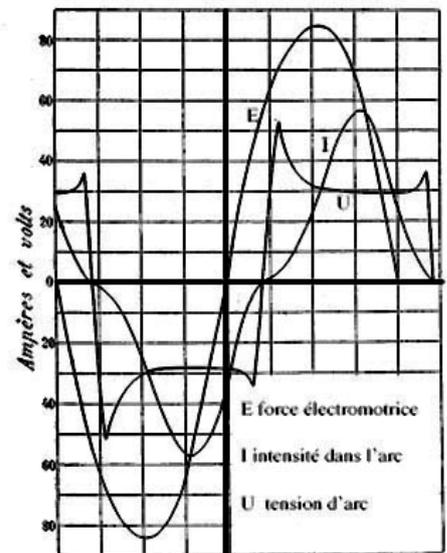
Le courant alternatif était déjà difficile à maîtriser en raisonnant avec deux fils comme le continu, c’est à dire en monophasé. Les inventeurs du moteur asynchrone compliquèrent les choses en imposant, en diphasé, deux circuits de même fréquence, mais déphasés de 90°, soit 4 fils, pouvant être réduit à 3 avec un commun. D’autres essayèrent le triphasé avec 3 circuits soit 6 fils, ce qui paraissait prohibitif, sauf si on réunissait 3 fils en un point commun, le neutre, qui lui-même pouvait servir de conducteur. Ils découvrirent l’avantage du montage étoile permettant d’obtenir deux tensions dans le rapport  $\sqrt{3}$  (c). De plus, ce **triphase** avait l’avantage sur le diphasé de transmettre l’énergie avec des pertes pouvant être réduites jusqu’à 50 % et un poids de cuivre réduit de 25%. Peut-être la magie du chiffre 3.



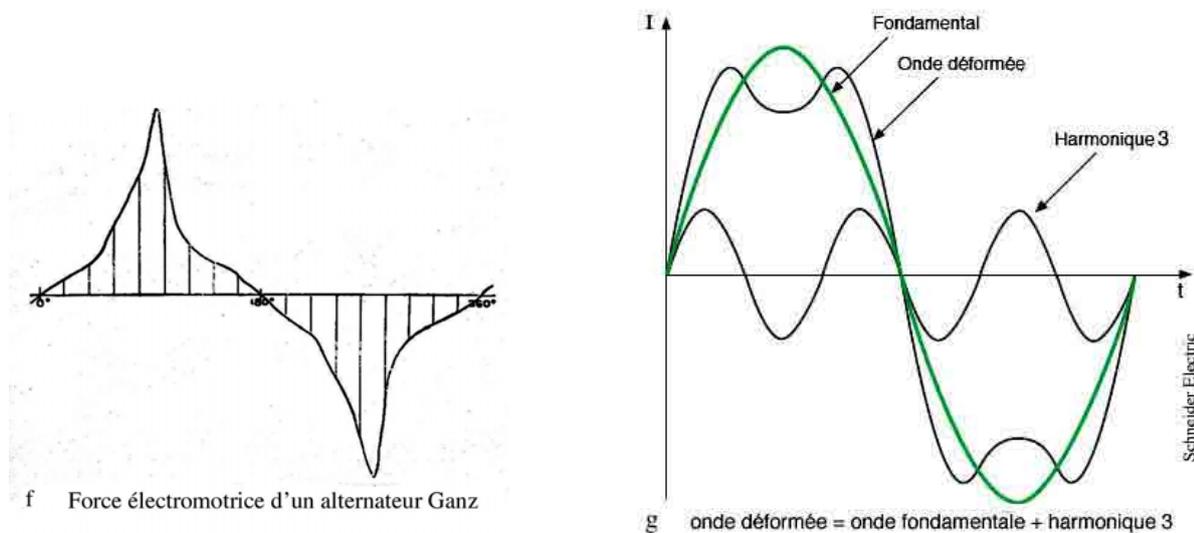
Ondographe de Blondel - 1892

Mais pour le profane, il paraît étrange que la somme algébrique des trois courants soit nulle. Il comprend mieux si on lui rappelle qu’en courant continu c’est la même chose, la somme du courant en sens contraire des deux fils est aussi nulle.

En 1892, André Blondel cherchait à enregistrer la forme graphique de la tension et l’intensité d’un arc électrique en alternatif, il inventa l’*ondographe*, devenu l’**oscillographe** électromagnétique, appareil devenu indispensable pour visualiser et comprendre les oscillations transitoires. (d) L’appareil pouvait enregistrer simultanément plusieurs signaux électriques, faisant dévier chacun un galvanomètre à miroir. Le faisceau lumineux d’une lampe reçu sur le miroir était renvoyé dans une chambre noire sur un papier photographique. Celui-ci était enroulé sur un cylindre mis en rotation par un mouvement d’horlogerie. Les courbes enregistrées sur le papier permirent à Blondel de mieux comprendre l’instabilité de l’arc des lampes. (e)



Relevé oscillographique d'un arc - Blondel



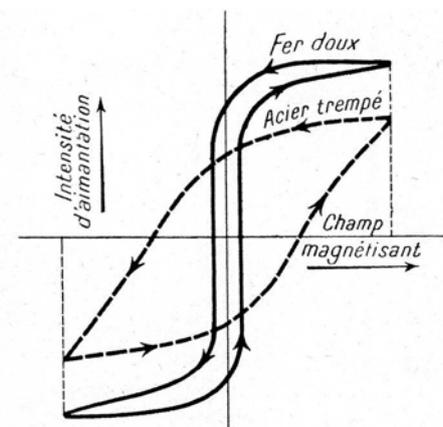
En enregistrant la courbe de la force électromotrice d'un alternateur, elle ne ressemblait que d'assez loin à une sinusoïde. (f) Cela troubla les électriciens, mais les travaux du mathématicien Joseph Fourier sur les grandeurs périodiques quelconques permettaient de les ramener à une somme de grandeurs **harmoniques** pour leur étude et calcul. (g) (3)

D'autres phénomènes inattendus sont apparus.

- L'**effet Ferranti** a intrigué lors de la mise en service de la centrale de Depford.

- L'**hystérésis** a été étudiée par Charles Proteus **Steinmetz**, arrivé en Amérique en 1889. Il était connu pour son étude sur l'hystérésis, le « retard » à l'aimantation des matériaux magnétiques, découvert en 1882 par le physicien écossais J.A. Ewing. Plus la surface du cycle d'aimantation-désaimantation est grande, plus il y a de pertes par échauffement si ce cycle est répété souvent, cas de l'alternatif.

Les pertes sont élevées avec de l'acier et minimales avec des matériaux magnétiques doux, ou mieux avec les tôles de fer allié avec du silicium, "à grains orientés" par un laminage particulier. (h) Steinmetz a beaucoup facilité les calculs de grandeurs sinusoïdales en courant alternatif avec la **méthode symbolique**, l'**opérateur j** et le phaseur.



h. Cycle d'hystérésis en courant alternatif

- L'**effet de peau** qui provoque une densité de courant plus élevée sur la périphérie qu'au centre des conducteurs massifs, ceci d'autant plus que la fréquence est élevée (4)

Tous ces problèmes n'ont été bien compris qu'après de nombreux échanges entre physiciens ou électriciens, principalement dans des articles des revues spécialisées et réunions des sociétés savantes. Elles furent intégrées progressivement dans les manuels d'électricité.

L'étudiant d'aujourd'hui apprend tout ceci assez rapidement avec quelques formules mathématiques, comme des définitions, des faits expérimentaux acquis, devenus évidents.

Qu'il essaie de se transporter à la fin du 19<sup>e</sup>, dans le brouillard où naviguaient intellectuellement les pionniers du courant alternatif. Il comprendra alors le type de difficultés qu'il devra peut-être affronter lui-même s'il doit participer un jour à des travaux dans un domaine nouveau, comme l'ont été les débuts de l'électronique dans le vide, ensuite à semi-conducteurs, puis l'informatique dans les années 1975/1980, ou comme le serait l'hypothétique génération d'électricité, demain dans les plasmas.

## L'alternateur

La machine électrique devenue la plus répandue n'était pas très complexe en principe, puisque inventée la première en 1832. Après quelques avatars, dont la machine de l'Alliance ou d'Holmes, elle connut un petit succès pour l'éclairage à arc sous le nom de *dynamo à courants alternatifs*. Gramme lui donna en 1878 une conception technologique proche de l'actuelle (II-3 zu) mais la faisait fabriquer par la Société d'éclairage Jablochhoff, considérant sans doute que cette machine n'était qu'un cas particulier d'un intérêt limité.

Lorsque, après 1885/90, le courant alternatif se révéla progressivement une solution incontournable pour le transport, Fontaine et Gramme ne réalisèrent pas que l'alternateur allait devenir la principale machine et laissèrent la place sur ce marché à nombre d'autres constructeurs. Il reste surprenant que des praticiens et théoriciens de compétence et expérience reconnue ne perçoivent pas les évolutions importantes à venir dans leur domaine. Le plus important constructeur à cette époque était Siemens, mais avec une technologie assez ancienne, un induit tournant sans fer comme dans les premières dynamos.

La solution de l'alternateur à induit tournant sans fer fut reprise d'une façon originale par Ferranti en 1882 (IV-2 zr) et cette conception lui permit de monter à 10 000 volts pour l'éclairage de Londres. Son associé en France, Patin, fabriquait un autre modèle lui aussi original (j) dans lequel l'inducteur tournant constituait en plus un volant d'inertie amortissant les brusques variations de charge, et de plus, pouvait être glissé horizontalement, permettant la réparation des bobines de l'induit. Cette machine intéressante, conservée au musée Ampère, avait fourni l'éclairage à la petite commune de Vif en Isère de 1894 à 1925.

On remarque cette préoccupation des constructeurs de l'époque de pouvoir facilement réparer les bobines induites. Les surtensions de foudre sur les lignes aériennes étaient mal absorbées par des parasurtenseurs sommaires, et provoquaient souvent des claquages de bobines dont l'isolation était précaire avec les matériaux de l'époque. En Angleterre, Mordey étudia d'autres variantes originales.

Pendant cette période 1890/95, la technique générale de l'alternateur était acquise, mais les nombreux constructeurs cherchaient à l'optimiser en plaçant l'induit tantôt sur le rotor, tantôt sur le stator, ceci en fonction de la vitesse, de la puissance ou la tension.

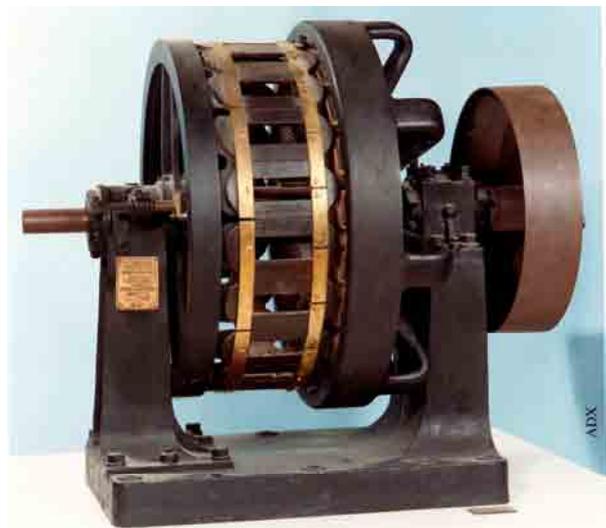
La mise en parallèle des alternateurs, indispensable pour la distribution d'énergie, était bien plus facile qu'avec les dynamos : elle occasionnait cependant des phénomènes gênants d'oscillations, provoquant des dégâts si l'un des alternateurs perdait brusquement son excitation. Ils furent résolus avec l'invention d'*amortisseurs* à induction par Hutin et Leblanc (5). Pour monter en tension, la mise en série des alternateurs n'est pas praticable, à l'inverse de la dynamo ; et n'a d'ailleurs aucun intérêt, le transformateur étant la machine idéale pour changer la tension.

L'alternateur a **trois caractéristiques** interdépendantes :

- Une vitesse et une fréquence qui déterminent un nombre de paires de pôles inducteurs.
- La vitesse est celle imposée, constante, par le moteur d'entraînement, la fréquence doit être au moins 40 à 50 Hz pour éviter le papillotement des lampes à incandescence (flicker), gênant à 25 Hz, par contre trop élevée elle fait tourner trop vite les moteurs.

Quant au nombre de paire de pôle P, il doit être tel que :  $P \cdot V \text{ tr/s} = \text{Hz}$

Hz étant la fréquence et V la vitesse en tours/seconde, ou V en tr/min/ 60



j Alternateur Patin

L'adoption d'une **fréquence standard** n'apparu que progressivement. Ce n'est qu'après 1900 que les fabricants américains en ont admis la nécessité, le chiffre de 60 Hz fut alors adopté sous la pression de G. Westinghouse, lequel comparait ce problème à celui des trop nombreux écartements des rails de tramway. En Europe, ce fut plus rapide, le leader de l'époque AEG choisit le 50 HZ vers 1895. Le 25 Hz fut parfois essayé, mais le flicker, devenait trop gênant. Le  $16\frac{2}{3}$  Hz répondait au besoin du système de traction en monophasé adopté en Europe centrale.

Ces choix du 50 et du 60 Hz résultaient à la fois du poids de l'histoire et de compromis entre avantages et inconvénients technico-économiques. Dans les marines, tous les navires qui jusque-là étaient restés en courant continu adoptèrent progressivement l'alternatif 60 Hz après 1970. L'aviation choisit le 400 Hz pour alléger le poids des générateurs et moteurs, et simultanément obtenir par redressement du courant continu avec peu d'harmoniques à éliminer pour l'appareillage électronique.

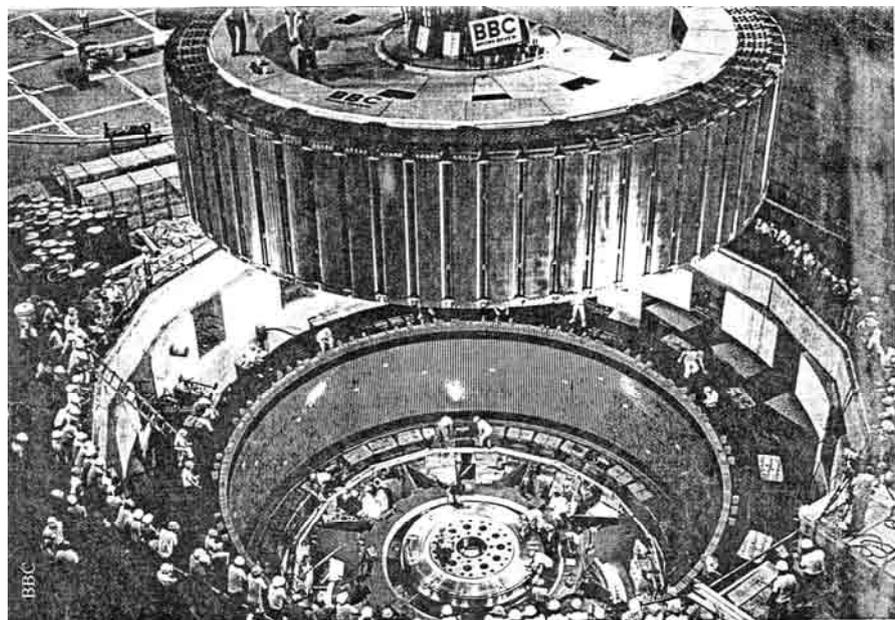
Aujourd'hui, les alternateurs attelés à des turbines hydrauliques, sont généralement des alternateurs "**lents ou hydrauliques**", les turbines tournent à de faibles vitesses plus elles sont puissantes, aussi le nombre P de paires de pôle de l'inducteur est élevé. Ces machines sont en général à axe vertical, avec un diamètre souvent plus grand que la hauteur. L'inducteur tourne à l'intérieur. L'alternateur le plus puissant, 700 MVA, a été installé à Itaipu (Brésil-Paraguay) en 1984 par BBC, un siècle après celui de Lauffen, de 0,2 MVA par Brown, fondateur de BBC (k) Sur la photo, des fourmis s'affairent dans ce stator avec 39 paires de pôles, sous un rotor de 2000 t qui va tourner à 92,3 t/min.

Par contre les alternateurs « **thermiques** » entraînés par des turbines à vapeur tournent nécessairement vite, 3000 tr/min à 50 Hz ou 3600 tr/min à 60 Hz, avec une seule paire de pôles inducteurs à l'intérieur. Les plus puissants sont à 2 paires de pôles et tournent donc à 1500 tr/min. Ces machines sont très longues à axe horizontal et de diamètre plus faible, 3 à 4 m.

La puissance, donc la taille des alternateurs n'a cessé de croître par paliers au XXe siècle, celle des groupes hydrauliques actuels plafonne à 700 MVA, celle des groupes thermiques (charbon, fuel, nucléaire) 1300 à 1600 MVA. Ils sont proches du maximum possible de la technologie avec refroidissement du rotor à l'hydrogène et du stator à l'eau.

Une technologie permettant un accroissement supplémentaire de puissance et des pertes réduites serait celle du **supraconducteur** cryogénique, refroidi à l'hélium liquide ( $-270^{\circ}\text{C}$ ).

Des prototypes développés dans plusieurs pays ont validé ce procédé depuis les années 1970, mais il apparaît trop coûteux à développer pour 1600 MVA. Cette rupture technologique ne serait envisageable qu'à partir de 2500 MVA, or quelle que soit la technique, une puissance unitaire aussi élevée devient risquée pour la stabilité des réseaux, en cas de défaillance d'une telle puissance pour un seul alternateur. Il est donc probable que l'on ne construira pas d'alternateurs supraconducteurs, dans l'état actuel de la technique.



Alternateur du barrage d'Itaipu - BBC - 700 MVA - 1984

## Le transformateur

Machine simple parce que statique, le transformateur a rapidement trouvé sa technologie définitive, d'abord en monophasé, puis en triphasé avec la culasse magnétique en étoile inventée par Dobrowolsky. Pour l'expérience de Francfort, les transformateurs avaient déjà été immergés dans une cuve remplie d'huile minérale, extraite du pétrole. L'huile a pour rôle de faciliter le refroidissement des bobinages en constituant un excellent isolant durable en haute tension. L'huile constitue toujours le meilleur agent de refroidissement des transformateurs, mais à la suite d'incendies qu'elle a provoqué, étant hautement inflammable, on lui a cherché des substituts pour les transformateurs en moyenne et basse tension installés dans à l'intérieur des locaux

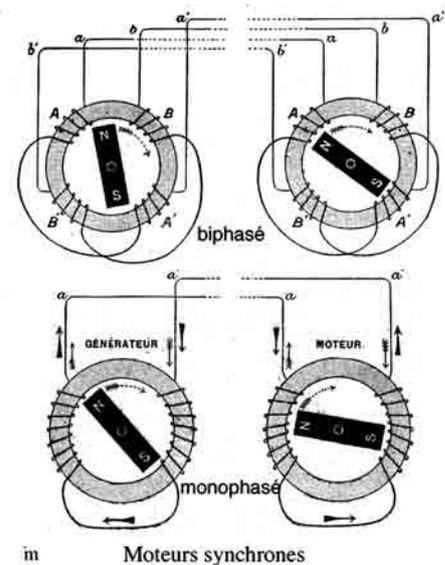
Un produit répondant au problème, bon isolant, totalement ininflammable, très stable chimiquement, même trop, fut trouvé vers 1930 dans la catégorie des PCB, sous différents noms de marque dont le *pyralène et l'askarel*. Plus cher que l'huile minérale, son usage fut cependant généralisé dans le monde pour équiper les transfos dans les bâtiments où l'on redoute l'incendie, particulièrement sous l'incitation des compagnies d'assurance qui réduisaient leur tarif en conséquence. Pour tous usages extérieurs, tous les grands transformateurs des postes éloignés des habitations, ou les petits sur poteaux, où l'incendie ne présente pas un danger pour le voisinage, l'huile plus économique a été conservée. Compte tenu de la grande stabilité chimique du pyralène, long à se dégrader naturellement, les normes électriques interdisaient son renvoi dans les égouts et imposaient sous le transfo, en cas de fuite, un bac de rétention du volume contenu dans la cuve. En cas de destruction, le pyralène, normalement peu dégradé, était réutilisé ou renvoyé pour recyclage au producteur. Mais en 1985, à la suite d'un incendie de bâtiment renfermant des transfos au Canada, suivi d'un autre à Reims, puis à Lyon, on constata que des produits toxiques **furanes et dioxine** pouvaient se dégager si du pyralène, non inflammable, était décomposé dans la flamme de plus de 1000 °C de l'incendie du bâtiment qui l'entourne. On ne savait pas à cette époque à partir de quelles doses, ces produits, à l'état de traces, étaient dangereux. Dans l'ignorance, tous les produits utilisant du pyralène et autres PCB furent interdits à la vente en 1987 et sa destruction progressive dans des usines spécialisées, par chauffage au-dessus de 1200<sup>0</sup> C, obligatoire avant 2010. (6)

La question pour les constructeurs était de trouver un diélectrique de refroidissement ininflammable pour les transfos et condensateurs, mais sans la toxicité probable du pyralène, même à froid. Les chimistes en proposèrent, mais vu les difficultés d'homologation et longues études sur des années pour prouver leur innocuité absolue, les fabricants se rabattirent, pour les appareils jusqu'à 24 kV, sur le plus simple et le plus sûr, l'air, malheureusement moins bon à la fois comme diélectrique et refroidisseur. Le transformateur est alors plus encombrant et plus onéreux d'au moins 50 %, ce qui impose aux utilisateurs un coût élevé pour très faible probabilité d'accident non mortel. Il est aussi plus bruyant en distribution urbaine

## Le moteur synchrone (m)

On avait vite découvert que la dynamo à courant continu était réversible, donc un bon moteur - heureuse surprise. De même pour l'alternateur, Hopkinson en 1879 et sans doute d'autres s'aperçurent qu'une dynamo alternative, un alternateur, pouvait en faire tourner un autre à la même vitesse, en synchronisme, mais il fallait le lancer à la main.

Lorsque Gaulard révéla en 1883 l'intérêt du courant alternatif grâce au transformateur, il réalisa qu'il manquait un moteur en alternatif. Dans sa première installation au métro de Londres il essaya de faire tourner en démonstration un alternateur en moteur ; cela pouvait marcher mais à condition de lancer la machine à la main, défaut rédhibitoire.



Ce problème de lancer le moteur à sa vitesse de synchronisme fit transpirer nombre de chercheurs. Tesla, dont la majorité des brevets concernait des moteurs synchrones ne trouva pas de solution satisfaisante. Ganz présentait à Francfort un moteur avec excitation par courant redressé approchant le problème.

Finalement, le procédé le plus efficace s'avéra être, vers 1893, le démarrage de la machine synchrone, transitoirement en moteur asynchrone à champ tournant. L'inducteur rotorique, connecté à deux bagues, est mis en court-circuit, sur les frotteurs. Lorsque l'on alimente le stator polyphasé, celui-ci crée un champ tournant, qui induit un courant dans le bobinage fermé du rotor, comme un asynchrone. Lorsque la rotation approche la vitesse de synchronisme, le rotor est ouvert puis alimenté en courant continu, permettant son « accrochage » à vitesse synchrone.

Le moteur synchrone tourne à vitesse rigoureusement constante, ce qui peut être un avantage, mais une surcharge mécanique peut le faire « décrocher » et le mettre ainsi à l'arrêt inopinément.

Il a l'inconvénient de nécessiter une source de courant continu pour son excitation, ce qui apporta des avantages découverts progressivement : il ne fait pas un appel d'énergie réactive au réseau comme l'asynchrone, et peut par surcroît en fournir si besoin en surexcitant son inducteur. (7)

Aujourd'hui le moteur synchrone est beaucoup moins utilisé que l'asynchrone, pour des cas particuliers, de fortes puissances, rarement en basse tension.

### Retour sur l'invention du moteur à induction polyphasé, asynchrone (8)

La dénomination de ce moteur pour courant alternatif a évolué suivant les époques. Au début c'était un alternomoteur, un moteur à induction, à champ tournant, d'abord polyphasé, diphasé puis triphasé, ensuite monophasé. Ce n'est que vers 1895 qu'il devint *asynchrone*, pour le différencier de l'alternateur réversible fonctionnant en moteur, le moteur *synchrone*.

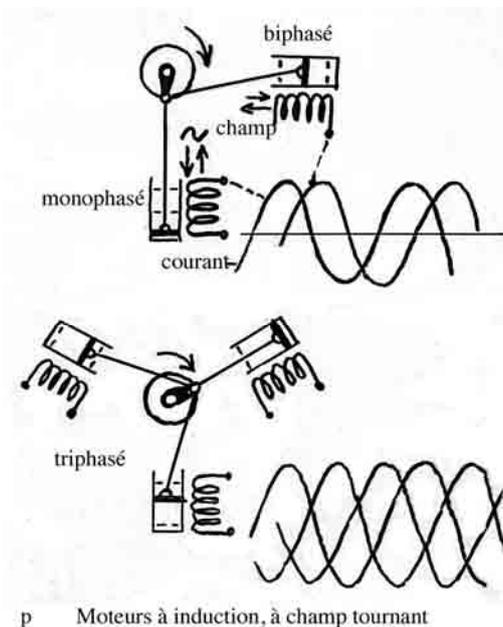
Le principe de cette machine, complexe sur le plan conceptuel, à l'inverse de sa fabrication simple, repose sur la production d'un champ magnétique variable induisant dans un bobinage fermé mobile un courant dont le champ déphasé s'oppose à celui qui l'avait produit. L'induit alors soumis à une force se met en mouvement.

Le courant alternatif dans l'induit est à la même fréquence que dans l'inducteur, s'il est maintenu bloqué, le système se comporte alors comme un mauvais transformateur en raison de l'entrefer, dont le secondaire est en court-circuit. S'il peut tourner, la fréquence va diminuer en fonction de la vitesse qui va se stabiliser à une vitesse inférieure à celle du synchronisme, ce *glissement*, s'accroissant avec l'énergie mécanique fournie.

Le champ tournant inducteur doit être créé par la composition de deux champs alternatifs au moins, dont les phases sont décalées d'une fraction de la période.

Ce fonctionnement n'est pas intuitif, mais se comprend avec une **analogie mécanique**, la transformation du mouvement linéaire de pistons en mouvement circulaire d'un moteur à vapeur de l'époque, la machine Brotherhood. Les pistons de ses trois cylindres, disposés en étoile, actionnaient des manivelles centrées sur un arbre commun (p).

On perçoit bien sur ce schéma qu'avec deux pistons à angle droit, en diphasé, cela marche, seulement un peu moins bien, mais avec un seul piston, le cas du moteur monophasé, la rotation s'entretient, mais le démarrage est impossible à partir d'un courant nul, le piston étant alors au début ou en fin de course.



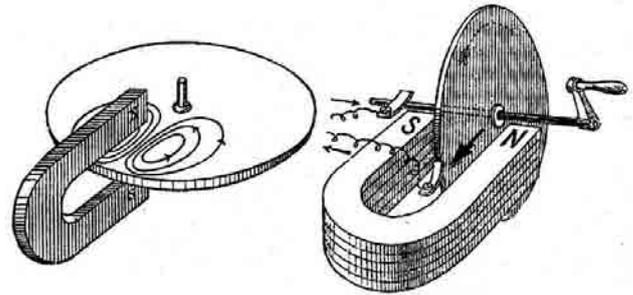
Ce moteur à induction est le seul qui combine les deux effets fondamentaux de l'électromagnétisme, l'induction d'un courant (Faraday) et les forces entre les conducteurs (Ampère), tous les autres moteurs n'exploitant que ces forces.

Pour comprendre comment une dizaine d'expérimentateurs ou théoriciens ont approché ou obtenu ce résultat du moteur à induction, retraçons en l'histoire, simplement parcourue au chapitre précédent, puisque c'était un élément clef de l'aptitude de l'alternatif au transport de force.

Cette invention, aussi difficile que celle du générateur à courant continu, était absolument nécessaire pour permettre l'exploitation universelle du courant alternatif.

### Les rotations d'Arago (I-5)

Ces phénomènes étaient restés incompris avant la découverte de l'induction par Faraday (1831), malgré les longues recherches expérimentales d'une dizaine de savants de diverses nations. Le mouvement de rotation relatif d'un aimant et d'un disque développait dans le disque conducteur des courants s'opposant à la rotation, ils entraînaient l'élément au repos, disque ou aiguille dans le sens de l'élément en rotation.



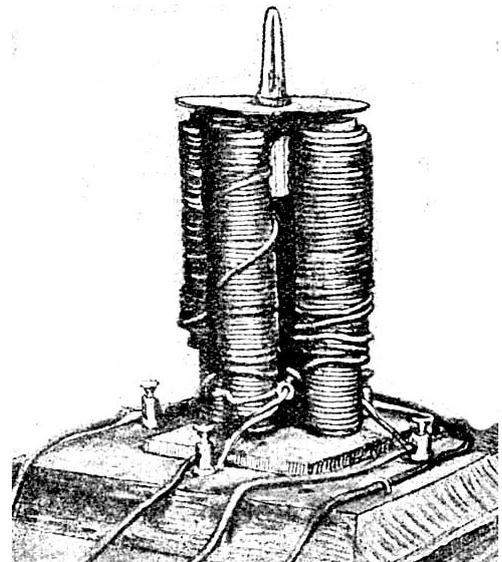
q Disque de Faraday - courants induits

Faraday montrait avec son disque tournant dans le champ d'un aimant, que les courants induits circulaient dans un circuit extérieur. Mais si on ne leur offrait pas cette issue, ils se refermaient dans la masse du disque. (q)

Ces rotations ont inspiré les recherches des suivants.

### Le moteur de Baily

En juin 1879 l'Anglais Walter Baily présentait à la *Physical Society* de Londres un moteur rudimentaire illustrant sa communication « *Un mode de production des rotations d'Arago* », publiée ensuite dans le *Philosophical Magazine*. Il se proposait de reproduire ces rotations avec des moyens électromagnétiques, sans apport d'énergie mécanique. Quatre noyaux de fer bobinés avec 150 spires étaient fixés sur une plaque de fer ; au-dessus pouvait tourner un disque de 6 cm de diamètre. (r) Les bobinages étaient connectés en série et les deux circuits arrivaient sur les touches d'un commutateur de contacts tourné à la main. Deux batteries envoyaient leur courant alternativement inversé dans les électros et le disque tournait d'autant plus vite que le commutateur était accéléré. Baily avait en quelque sorte « fabriqué » un courant haché, s'inversant périodiquement, très semblable à un courant alternatif non sinusoïdal, proche de l'alternatif.



r Moteur polyphasé Baily - 1879

Il expliquait que son système remplaçait la rotation de l'aimant d'Arago par la rotation intermittente du champ des électroaimants. Il avait créé un « champ tournant ».

En plaçant au-dessus du disque un deuxième groupe d'électros, l'action serait amplifiée. À cette époque, avec l'apparition récente du moteur à courant continu, on n'avait pas besoin d'un moteur de ce genre, même si quelqu'un avait imaginé de remplacer le courant intermittent commuté venant des batteries par de l'alternatif, ce que réalisera un inventeur, Tesla, dix ans plus tard.

Ce jouet scientifique était bien l'ancêtre du moteur à induction biphasé.

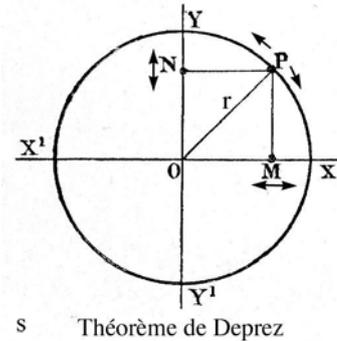
## Deprez et le champ tournant

En 1880, Marcel Deprez présentait à la Société de Physique un mémoire sur la synchronisation électrique avec un commutateur rotatif, analogue à celui de Baily. Ce dispositif ingénieux, probablement destiné aux horloges électriques, ne produisait pas de champ tournant, ce que certains auteurs ont cru y discerner.

D'autre part, il communiquait en 1883 à l'Académie un théorème géométrique intéressant montrant la production d'un champ magnétique tournant par la combinaison de deux champs alternatifs différents d'un quart de période. Si le point P de la figure (s) tourne autour du centre O d'un mouvement uniforme,  $ON = r \sin \omega t$  et  $OM = r \cos \omega t = r \sin (\omega t + \pi/2)$ . Les points M et N oscillent alors sur leurs axes avec une valeur sinusoïdale décalée de  $\pi/2$ , comparables au champ magnétique de deux bobines à angle droit, dont la somme vectorielle OP est un champ tournant.

C'était une abstraction géométrique, mais Deprez ni personne d'autre n'en tira les conséquences en rapprochant la théorie de ce champ tournant de celui qu'avait réalisé en pratique Baily, sans le savoir, dix ans plus tôt pour faire tourner son petit moteur. (9)

Domage que Deprez ait ensuite manifesté une forte allergie au courant alternatif, sinon il aurait pu être l'un des inventeurs du moteur asynchrone à champ tournant, en appliquant son théorème.

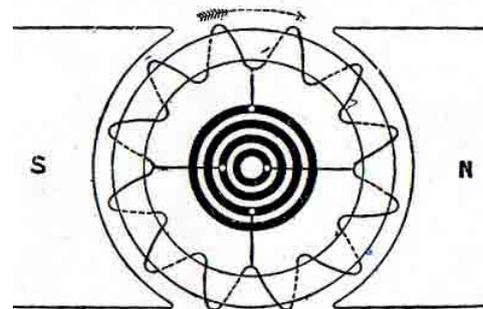


s Théorème de Deprez

## Les moteurs de Bradley

Au nombre des pionniers, inventeurs de moteurs polyphasés, il faut compter aussi l'Américain Charles Schenk Bradley. En mars 1887, il prend un premier brevet d'un générateur polyphasé entraînant un moteur synchrone, mais assez confus.

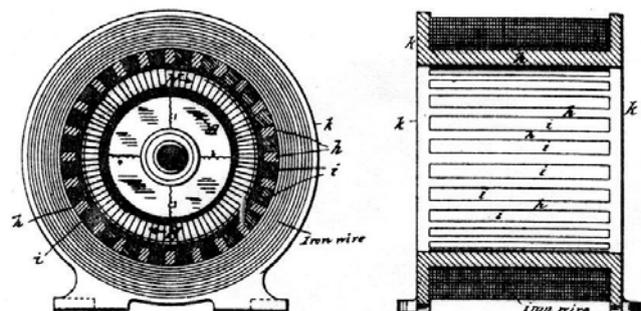
Un autre brevet du 8 mai, accordé le 2/10/1888 (10), décrit une machine type dynamo Gramme dont l'induit n'est pas raccordé en de multiples points aux lames d'un collecteur, mais seulement quatre points sont connectés à quatre bagues sur lesquelles frottent des balais de contact (t). C'était un générateur diphasé de deux tensions alternatives décalées d'un quart de tour. Il n'avait apparemment pas d'objectif précis d'utilisation, mais constatait qu'une telle machine tournait en moteur si elle était alimentée par une autre identique en générateur, un moteur synchrone.



t Machine Bradley 1888

Il réalisa qu'elle pouvait faire plus, si on conservait le collecteur pour courant continu, un convertisseur d'alternatif en continu. (voir ci-après).

Quelques mois après, le 5/10/1888, il dépose un brevet, accordé en 06/1889, d'un véritable moteur à induction diphasé original, extrapolé de la machine précédente. Le rotor est identique, un anneau Gramme dont quatre points sont relié à quatre bagues permettant son alimentation en diphasé, sauf que ce n'est plus l'induit mais l'inducteur. L'induit est alors sur le stator, à la périphérie, une sorte de cage de conducteurs en court-circuit, complètement enveloppé dans une couronne magnétique, constituée par un ruban de tôle de fer enroulé. (u)



u Moteur à induction Bradley

On peut accorder à Bradley d'avoir le premier réalisé un induit en cage d'écureuil, mais celui de Dobrowolsky, conçu l'année suivante était rotorique. Son moteur apparaissait quelques mois après les publications de Ferraris, suivies de celle de Tesla, qui ne l'a très probablement pas inspiré, de par sa conception nettement différente. En dehors des dates très proches, on peut considérer avec une bonne probabilité qu'aucun de ces trois inventeurs ne s'est inspiré des autres.

Ce qui est intéressant, c'est le fait que trois personnes aient obtenu un résultat valable à l'échelle du prototype, en appliquant les mêmes principes électromagnétiques, mais avec une conception technologique différente.

Quelques jours après ce brevet, le 20 octobre, Bradley prenait un brevet général « *Système de distribution d'énergie électrique* » regroupant les brevets précédents, mais cette fois en triphasé, le générateur, identique au moteur synchrone, et le moteur asynchrone. Les trois machines avaient des points communs, un rotor avec le primaire bobiné, relié à trois bagues de contact et frotteurs. Cependant le défaut technologique du moteur asynchrone de Bradley était d'avoir l'inducteur sur le rotor, nécessitant des bagues avec des balais frotteurs, alors que le grand avantage de l'asynchrone sera l'absence de tout collecteur ou bagues de contacts par frotteurs, ainsi que le rotor à cage, non bobiné, simple et robuste.

Bradley n'avait pas, semble-t-il, ni les moyens ni l'ambition de développer industriellement ses moteurs ; il avait pourtant été à bonne école en travaillant chez Edison. Ses brevets concernant l'asynchrone furent cependant considérés comme des atouts pour ceux, comme Général Electric, qui contestait ceux de Tesla-Westinghouse.

### *Le moteur de Ferraris*

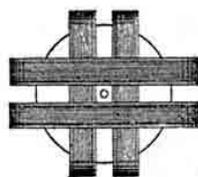
Il a été présenté ci avant (IV-2), comme une utilisation d'une source de deux courants diphasés décalés de  $90^\circ$  que ce savant avait découvert au primaire et au secondaire d'un transformateur. Il ignorait probablement le moteur de Baily, ne connaissant pas l'anglais, s'appuya peut-être sur les rotations d'Arago, mais c'est essentiellement l'analogie avec la théorie de Fresnel sur la lumière polarisée qui a conduit Ferraris au champ tournant pour réaliser en 1885 ses premières maquettes de moteur n°1 et n°2, signalées au précédent chapitre. Elles lui paraissaient cependant sans grand intérêt pratique, puisqu'il ne fit même pas une communication et les rangea au placard.

C'est une démarche inventive assez fréquente et féconde, rapprocher des faits ou théories d'un domaine de la physique pour les transposer dans un autre domaine. Deux ans plus tard, en 1887, le problème du moteur en alternatif commençait à se poser avec acuité, il reprit ses travaux et perfectionna ses maquettes et réalisa l'appareil n°3 (v), qui ressemblait beaucoup au prototype que Tesla présenta en 1888. Il figurait au stand italien de l'exposition de Chicago en 1893.

Pour en faire un véritable moteur d'étude, il en construisit un autre (w), n°4, plus grand avec 2 bobines inductrices par phase et un induit, cylindre de cuivre, de 4,5 kg, long de 18 cm.



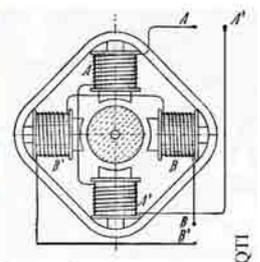
w Moteur à induction - Ferraris 4 - 1887



Museo elettrico Ferraris



v Moteur à induction 3, Ferraris - 1887



**Ferraris** établit une première **théorie** élémentaire de ce moteur et nota l'importance du *glissement*, différence entre la vitesse de rotation du champ tournant inducteur synchrone et celle du rotor massif. Il comprit que le courant induit était proportionnel au glissement, donc très élevé à l'arrêt en bloquant le rotor. Dans la théorie plus approfondie qu'il publia en 1893 (11) il remarqua que lorsque le rotor était bloqué, le courant induit très important, 6 à 8 fois sur nos moteurs actuels, était à la fréquence de la source, mais diminuait en fonction de la vitesse du moteur, en restant toujours inférieure de quelques % à la vitesse synchrone. D'où son autre nom d'*asynchrone*, adopté plus tard. Il remarqua une propriété intéressante du moteur, l'inversion du sens de marche quand on permutait les deux fils d'alimentation d'une phase. À l'arrêt, bloqué, le moteur constitue un transformateur avec un primaire et un secondaire fermé en court-circuit, d'où ce courant important au démarrage, un sérieux inconvénient. Le moteur asynchrone est sans doute la machine dont la théorie est la plus complexe, difficilement accessible au calcul. Aussi, après la deuxième étude théorique de Ferraris en 1894, d'autres théoriciens, Heyland, Field, Hutin et Leblanc ont eu recours à des constructions graphiques.

Il a été relaté comment Ferraris avait refusé à Westinghouse en 1888 de breveter son invention, tout au moins en Europe, considérant qu'elle devait bénéficier à toute l'humanité. Rare comportement, qui a favorisé une diffusion rapide du moteur, en particulier son industrialisation réussie par Dobrowolsky, sans querelle de brevet. En Amérique, il y eut quelques contestations juridiques des brevets Tesla achetés par Westinghouse, mais pas de grandes batailles comme celles d'Edison. Les protagonistes savaient bien qu'au fond, la mise dans le domaine public du moteur de Ferraris rendait caduc celui de Tesla, même en Amérique. Ce qui a permis au grand concurrent General Electric de fabriquer des moteurs asynchrones triphasés, plus intéressants que le biphasé de Westinghouse, sans payer de redevances. Pour une fois les experts juridiques en brevets ne se sont pas enrichis aux dépens des inventeurs.

### *Les brevets Tesla*

Après la très brillante conférence de mai 1888 à l'AIEE de ce croate inconnu, arrivé en Amérique en 1884, le monde découvre que Tesla aurait résolu ce difficile et important problème du moteur en courant alternatif. Il en présente trois, dont deux synchrones et un seul à induction, accompagnés de deux maquettes, les seules que Tesla ait fait réaliser.

En dehors de dizaines de brevets ultérieurs sur les machines à courant alternatif, il n'indique rien d'autre sur ses recherches dans ce domaine que les 100 pages de son autobiographie *My inventions*. Ce livre est assez décevant sur le plan scientifique ; sur l'invention du moteur asynchrone ne figurent que les 10 lignes citées au chapitre précédent, une sorte d'illumination qui lui a fait découvrir la solution des années plus tôt. Il aurait construit un prototype en 1883 lors d'un séjour à Strasbourg, mais n'avait pas réussi à y intéresser quelqu'un. Aucune indication sur cette maquette disparue.

L'analyse précise des brevets par T. C. Martin (1891-1894) ou mieux Sylvanus Thompson (1895-1901) éclaire mieux sur les points innovants qu'ils apportent (8). La méthode de Tesla consistait à rédiger un brevet sur chacune des idées telles qu'elles lui viennent à l'esprit, sans chercher à les améliorer d'abord, ou les tester sur une maquette. Quand plus tard il perçoit une amélioration, il rédige un nouveau brevet. Il en résulte beaucoup d'idées dépassées par les suivantes. Il a déposé près de 300 brevets, dont 112 aux US.

Comme nous l'avons souligné, il y a dans ces dizaines de brevets nombre de détails déjà connus et la plus grande partie porte sur des moteurs synchrones et des dispositifs pour assurer leur démarrage, en décalant la phase d'une partie des bobinages avec des résistances et inductances. D'autres moteurs dans lesquels la rotation est obtenue « *par attraction directe des éléments magnétiques* », ce que nous appelons moteurs à réluctance ou à répulsion. Il ne perçoit pas que tous ces moteurs ont moins d'intérêt que celui à induction. Sa grande préoccupation depuis ses débuts en France était de trouver un moteur sans collecteur et balais, crachant trop souvent des gerbes d'étincelles quand ils sont mal réglés. Une solution s'ouvrait avec l'alternatif produit par un alternateur réversible, devenant moteur synchrone, mais sans démarrer seul.

Son **premier moteur à induction** intéressant n'apparaît que dans un brevet de fin 1887, et il est significatif que Tesla le considère comme une amélioration notable d'un système inventé par un Anglais, qu'il décrit implicitement : « *Je sais bien que la mise en rotation d'un moteur par le déplacement intermittent des pôles n'est pas une chose nouvelle. On l'a réalisé en faisant passer par des bobines actives indépendantes le courant issu d'une pile ou autre source de courants continus et en renversant ce courant par des dispositifs mécaniques convenables, de manière à lui faire parcourir les bobines alternativement en sens contraires...* ». C'est exactement la description du moteur de Baily. « *Dans mon invention, au contraire, j'emploie de véritables courants alternatifs. ... les avantages de mon système sautent aux yeux* ».

Cette démarche inventive, consistant à améliorer ce qu'ont trouvé des prédécesseurs est classique. Pourquoi Tesla veut-il nous faire croire dans *My inventions* que c'était une illumination en récitant des vers de Goethe ? Peut-être une tendance à une mise en scène théâtrale de la science que l'on retrouve dans ses conférences et activités ultérieures.

Comme après toute invention se posent des questions : par quelle idée, intuition ou analogie, par quels raisonnements ou essais de prototypes, comment l'inventeur est-il arrivé à ces moteurs ? Dans le cas très particulier de Tesla, il n'y a pas de réponse. Tesla se présentait comme un personnage unique qui élaborait tout dans sa tête, avec d'étranges éclairs, *flashes*, comme il l'explique dans son autobiographie *My Inventions*.

Par exemple, l'invention d'un moteur en courant alternatif, sujet de réflexion qu'il avait depuis des années : « *Je musardai avec un ami dans les jardins publics de Budapest, récitant de la poésie... le Faust de Goethe. Le soleil déclinait quand je me souvins de ce passage grandiose — Sie rückt und weicht, der Tag ist überlebt... Quand je prononçai ces mots ensorcelants, une pensée me vint comme un éclair et la vérité me fut immédiatement révélée. À l'aide d'un bâton, je dessinai sur le sable des diagrammes que mon compagnon déchiffra sur-le-champ; je devais les exposer six ans plus tard à l'Institut américain des ingénieurs. Les images que j'entrevois étaient éclatantes et distinctes, de sorte que je lui dis : Vois ce moteur et regarde comme je vais l'inverser. Je suis impuissant à vous décrire mes émotions...*

Des biographes de Tesla ont intitulé leurs livres : *Man out of Time ou Prodigal Genius ou Electrical Genius*. On imagine pourquoi, à lire son autobiographie.

Dans les derniers brevets, Tesla signale la possibilité d'avoir un retour commun dans un système biphasé, soit trois fils au lieu de quatre.

Il évoque aussi un système triphasé avec un point commun inspiré de la machine connue de Thomson Houston que Haselwander avait lui aussi exploité. Pourtant il ne perçoit pas l'intérêt du système étoile-triangle et du neutre commun. Homme d'idées sans la préoccupation des cotés pratiques, il ne trouvera pas ce grand avantage économique et de robustesse constitué par le rotor en cage, non bobiné, principal avantage du moteur Dobrowolsky.

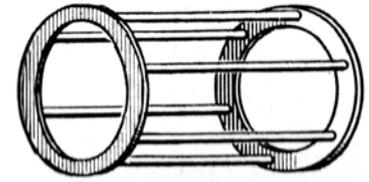
Il entrevoit aussi de générer avec cette machine du courant continu, ce qu'on appellera une commutatrice. Alors qu'en 1887 Tesla se contentait de faire des inventions par écrit, non confirmée par une maquette, Haselwander faisait tourner un premier moteur triphasé de 10 ch, malheureusement sans prendre de brevet.

En résumé, un foisonnement d'idées dans lesquelles il faut trier pour approfondir celles qui paraissent valables et réellement nouvelles, mais il manque surtout l'opiniâtreté du chercheur qui s'acharne à vérifier si son idée, son brevet, est réalisable en pratique sur des maquettes et prototypes. Après une année passée à Pittsburgh sans pouvoir réaliser un seul moteur avec les techniciens de Westinghouse, il s'est avéré que Tesla n'avait malheureusement pas cette qualité. Ce fut regrettable pour lui que ne se soit pas rapidement trouvé parmi les ingénieurs de Westinghouse un « développeur », capable de transformer ses idées en machine industrielle, comme Dobrowolsky l'avait fait à l'AEG, d'après les prototypes de Ferraris.

### Le moteur de Dolivo Dobrowolsky

Il est partiellement décrit au chapitre précédent.

Ce jeune ingénieur de l'AEG n'a pas vraiment inventé un moteur, mais a joué le rôle du développeur efficace de l'invention de Ferraris, que celui-ci avait refusé de breveter pour la laisser dans le domaine public, un rare humaniste. Tout en lui donnant une structure industrialisable, il y a ajouté deux perfectionnements essentiels, l'alimentation en triphasé au lieu du biphasé, qu'il a d'ailleurs emprunté à Haselwander, et le rotor induit massif, non bobiné, en cage d'écureuil (x). Cette invention majeure améliorerait l'efficacité magnétique et électrique ainsi que la robustesse et la simplicité technologique, d'où un moteur bien plus économique et endurant que son homologue à collecteur pour le continu.



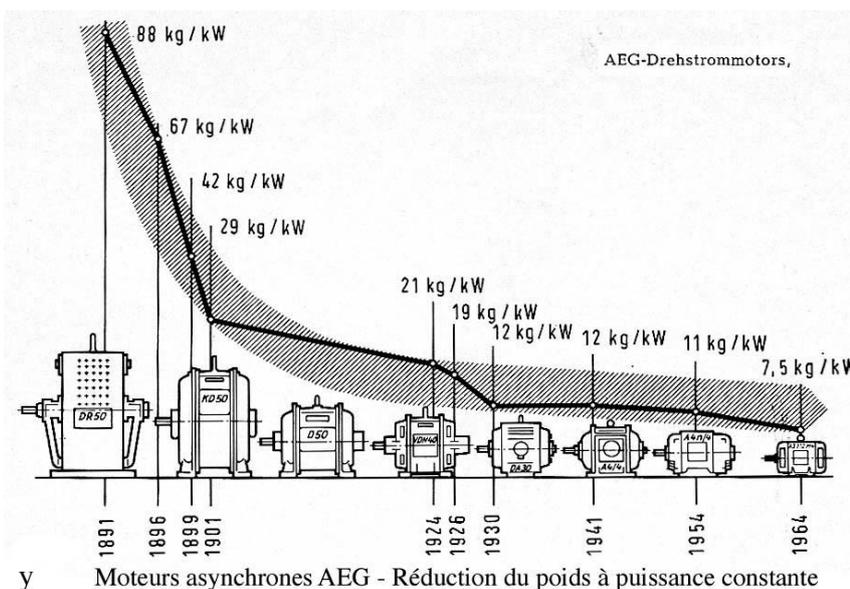
X ROTOR À CAGE D'ÉCUREUIL.

En 1890, Dobrowolsky conçoit cependant pour des moteurs plus puissants un rotor bobiné avec des résistances insérées en série au moment du démarrage. L'appel de courant trop fort se trouve limité, tout en conservant un couple de démarrage élevé.

Le moteur asynchrone, finalisé dès 1891, avait néanmoins un inconvénient d'ordre électrique inhérent à son principe. Il n'avait pas besoin, comme son homologue synchrone, de disposer d'une source en courant continu pour exciter son inducteur. Alors il lui fallait pourtant, comme toute machine, « magnétiser » son circuit magnétique avec un courant emprunté au réseau d'alimentation. Ce courant dans un bobinage inductif était déphasé, et sa superposition au courant actif transmettant l'énergie mécanique donnait un courant global avec un « mauvais  $\cos \varphi$  » de 0,8, trop différent de l'optimum 1. Ce problème n'avait pas été compris clairement lors des premières expériences de Francfort.

L'avantage incontestable de ce moteur, objectif de tous ses inventeurs est l'absence de collecteur avec ses balais, accessoire onéreux nécessitant périodiquement un entretien pour remédier aux dégâts des étincelles. Par ailleurs, cela permettait de fabriquer des moteurs asynchrones puissants d'une dizaine de kV, alors que le collecteur limitait la dynamo à 3 kV.

À partir de la maquette artisanale de Ferraris, Dobrowolsky a réalisé en deux ans seulement un moteur industriel de 100 ch, bien au point, semblable à la dimension et au poids près, aux centaines de millions de moteurs asynchrones qui tournent aujourd'hui. (y) Ce développement en puissance aussi rapide pour une machine électrique est un exemple rare. (12)



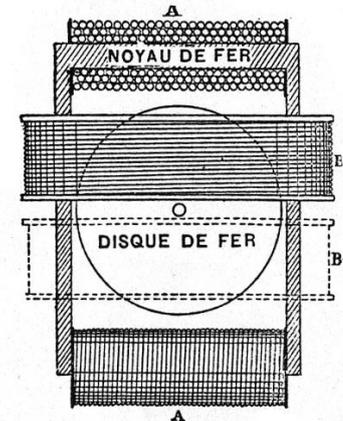
*Système de distribution de Wenström* En Suède, Jonas Wenström prend lui aussi un brevet, le 20/1/1890, couvrant tout un système de distribution triphasé, bien étudié, avec générateurs, transformateurs éleveurs et abaisseurs et moteurs asynchrones. C'était intéressant, mais tout cela était connu. Il avait créé en 1883 la société suédoise ASEA, future concurrente importante d'AEG allemande et BBC suisse (Brown Boveri Co). La fusion de ASEA avec BBC, devenues ABB, intervint en 1988.

### Alternomoteurs simples, ou monophasés

Cette dénomination différenciait à l'origine ce type de moteur des modèles diphasés ou triphasés. Aujourd'hui c'est le **moteur asynchrone monophasé**. Sa conception hésitante s'est déroulée marginalement par rapport à l'objectif principal le moteur polyphasé.

A priori, il n'apparaissait pas envisageable de le dériver du moteur à induction polyphasé, nécessitant deux sources déphasées pour créer son champ tournant. Cependant une solution se dégagait progressivement en trois étapes.

**Charles Borel**, ingénieur suisse, breveta en 1888 un compteur pour courant alternatif monophasé qui était en fait un petit moteur diphasé (z) dont deux enroulements A étaient traversés par le courant à mesurer et deux autres bobines B inductives par un courant dérivé, en série avec une résistance, donc déphasé. Le champ résultant des deux enroulements était donc tournant et mettait en rotation un disque, lequel entraînait des roues d'horlogerie de compteur



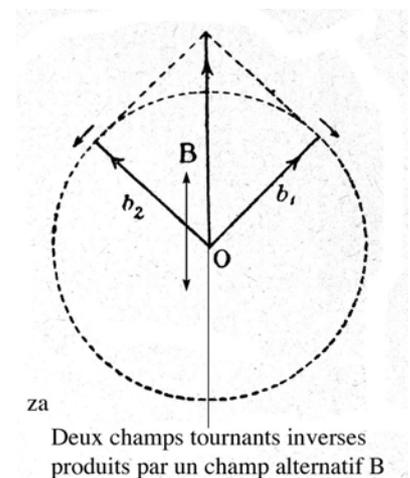
z Moteur de compteur Borel

Cette idée de créer une phase auxiliaire décalée par rapport au courant principal fut reprise, sans doute indépendamment, par plusieurs autres expérimentateurs. Ce fut le cas de Hutin et Leblanc, ces rares ingénieurs français qui se sont intéressés tardivement à perfectionner le moteur asynchrone. De même, Tesla, au cours de l'année 1889, qu'il passa à Pittsburg, les ingénieurs de Westinghouse souhaitaient qu'il les aide à développer un moteur monophasé. L'échec de ces tentatives a été relaté.

**Hutin et Leblanc** publiaient en 1891 le théorème qui a été à la base du moteur monophasé : Un flux alternatif de valeur sinusoïdale B peut être considéré comme la somme de deux flux constants égaux  $b_1$  et  $b_2$  tournant en sens inverse à la même vitesse, tels qu'ils fassent un tour complet pendant la durée d'une période du flux B (za).

Ce théorème explique qu'un moteur monophasé peut donc tourner sous l'effet de l'un des deux champs tournants inversés créés par son inducteur. On avait bien constaté qu'un petit moteur asynchrone diphasé dont on alimente une seule phase ne démarre pas, mais si on le fait tourner rapidement à la main, il continuera à tourner dans le même sens. De même si on le lance en sens inverse.

La réciproque de ce théorème était énoncée plus tard en 1893 par Ferraris dans les mémoires de l'Académie de Turin en appliquant un raisonnement développé en optique. (13) Il ne semble pas qu'il ait eu connaissance de la publication des français, et il s'attaqua à la théorie du moteur asynchrone, plus difficile en monophasé.

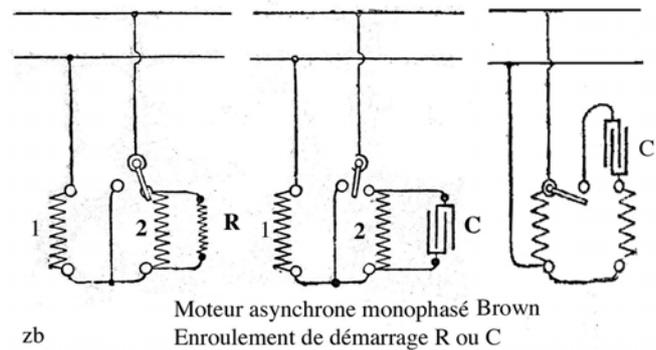


za Deux champs tournants inversés produits par un champ alternatif B

De cette découverte théorique, les chercheurs exploitèrent une conséquence heureuse ; la phase auxiliaire qu'ils ajoutaient pour créer un champ tournant n'était utile que pour lancer le moteur, il devenait possible de la couper dès que le moteur avait démarré, une appréciable simplification. De plus, plutôt que d'obtenir un déphasage par inductance, certains proposaient d'adopter un condensateur, probablement une idée de Hutin et Leblanc. Mais à cette époque, le condensateur était encore un composant peu utilisé, sa technologie restant artisanale, des feuilles d'étain séparées par un papier isolant.

Le duo Hutin-Leblanc le perfectionna avec de feuilles minces de papier huilé. L'étain était le seul métal utilisable, l'aluminium restait un métal très coûteux jusqu'à sa production électrolytique à la fin du siècle.

Les éléments du moteur asynchrone monophasé étaient réunis et les perfectionnements se succédèrent, principalement la coupure par un interrupteur automatique centrifuge de la phase auxiliaire de démarrage, solution trouvée probablement par Général Electric. Le Suisse Brown, qui cherchait à contourner le brevet du moteur triphasé d'AEG, développa des moteurs monophasés avec différents schémas (zb). Ce moteur était assez loin des performances de son aîné, le triphasé, en couple de démarrage, déphasage et surtout rendement, inférieur à 80%.



Néanmoins, son grand avantage de ne nécessiter qu'une phase, en a fait le moteur le plus répandu, mais uniquement pour des petites puissances, jusqu'à 2 kW.

Aujourd'hui des centaines de millions de moteurs asynchrones monophasés équipent les machines à laver, réfrigérateurs et autres systèmes de petite puissance.

### En conclusion

Pour cette difficile invention du moteur asynchrone,

– d'une part, les démarches inventives différentes pour réaliser ce champ tournant n'ont pas résulté du hasard. Ferraris a probablement rapproché les études sur la lumière de Fresnel des rotations d'Arago, Tesla a appliqué l'alternatif au moteur de Baily,

– d'autre part, l'association intellectuelle du théoricien Ferraris avec le praticien Dobrowolski a été plus féconde sur le résultat et plus rapide que les idées de Tesla, qualifiées souvent de géniales, mais ont demandé pour leur concrétisation des années à une équipe d'ingénieurs de Westinghouse.

Mais quel serait alors l'inventeur du moteur asynchrone ?

Pour le lecteur préoccupé par cette difficile et inutile question, le choix a déjà été un peu simplifié en mettant en tête de la liste, les trois principaux intervenants Ferraris, Tesla, Dobrowolsky, dans l'ordre de leur entrée en scène.

Si l'on considère le premier breveté, alors Tesla est en tête et Ferraris disparaît ayant refusé de breveter.

Pour le moteur monophasé, Hutin et Leblanc ont finalisé une recherche collective.

D'autres ont approché la solution sans finaliser, Bradley, Borel, E. Thomson.

N'oublions pas Baily, inspirateur de Tesla, ni les suiveurs Brown, Wennström, ni Haselwander dont le moteur triphasé n'était pas à induction.

### Générateurs asynchrones

Hutin et Leblanc démontraient dans *La Lumière électrique* de mai 1891 la propriété des machines asynchrones de fonctionner en génératrices (brevet 3/1890). D'autres expérimentateurs, dont Brown et les ingénieurs de General Electric ont reconnu indépendamment cette réversibilité intéressante. Il faut alors l'entraîner, par un moteur mécanique, à une vitesse supérieure à celle du synchronisme.

Mais la machine asynchrone n'est pas autoexcitatrice, elle ne peut fonctionner que si elle est branchée sur un réseau alternatif polyphasé qui va lui fournir son courant d'excitation, un courant inductif, donc déphasé. Aujourd'hui, on peut compenser ce réactif en branchant aux bornes une batterie de condensateurs. Mais au démarrage, il est indispensable qu'elle soit alimentées par un réseau. Handicap sérieux pour les milliers d'éoliennes en cas de black-out.

### Autres moteurs en alternatif

Il ne faut pas pour autant ignorer ceux qui ont mené des recherches parallèles, intéressantes, sur d'autres principes, qui ont pu aboutir à une solution valable ou même influencer les précédents, par exemple l'ensemble dynamo génératrice – moteur d'Haselwander, initiateur du triphasé.

#### Le moteur universel

Il était logique que quelques électriciens essayent de faire tourner le moteur à courant continu en alternatif. Cela marchait à peu près, en basse tension, à condition de feuilletter le circuit magnétique inducteur et de le raccorder en série, avec en conséquence une vitesse très variable, allant jusqu'à l'emballement sans charge. Pourtant les fortes étincelles aux balais détérioraient vite le collecteur. Il fallait réduire l'inductance trop élevée. Avec des améliorations par tâtonnement, dont le branchement d'un petit condensateur aux bornes des balais, les étincelles ont été réduites.

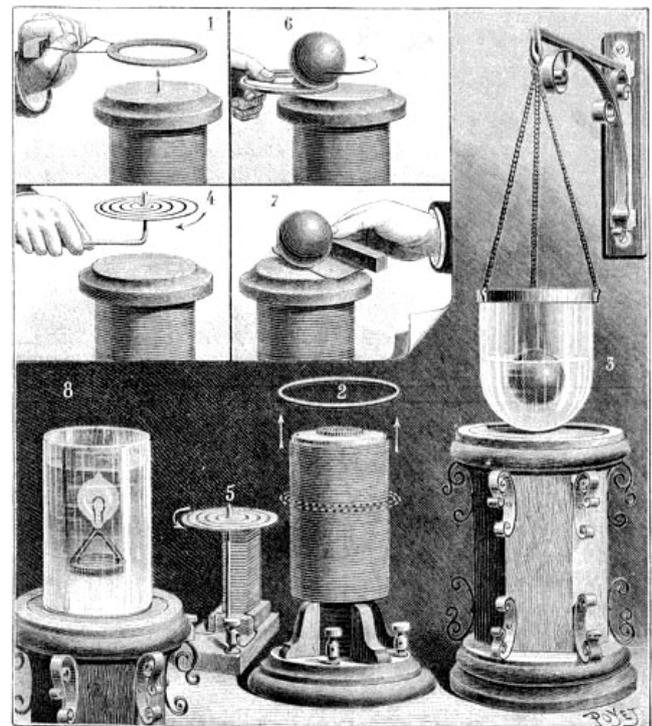
Encore aujourd'hui ce moteur, baptisé *universel*, est très répandu, pour des petites puissances d'un kW maxi et un service occasionnel, convenant aux outils électroportatifs et à l'électroménager.

#### Expériences d'Elihu Thomson

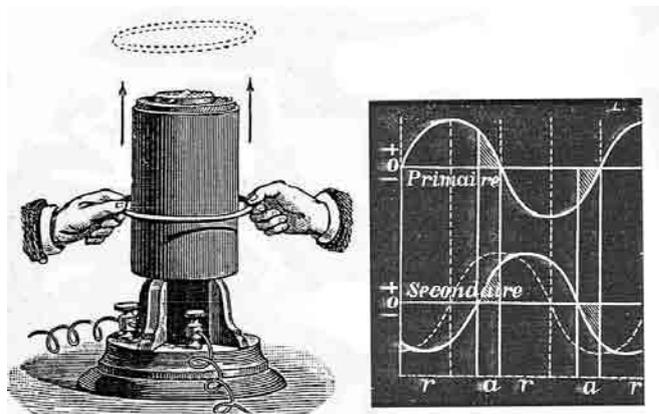
Le fondateur de Thomson Houston, société rachetée ensuite par Général électrique fut avec Westinghouse l'un des deux promoteurs américains du courant alternatif. En 1887 il avait fait plusieurs montages expérimentaux permettant de visualiser des répulsions et rotations électrodynamiques obtenues entre une bobine à noyau magnétique et le courant induit qu'elle génère dans des anneaux ou des boules. (zc)

Ces expériences présentées à l'exposition de 1889 à Paris avaient étonné le public, en particulier l'expérience n° 8, avec un enroulement induit dont le courant se refermait à travers une lampe, l'ensemble étant placé au-dessus de la bobine dans une vase rempli d'eau. Lorsque le courant circulait dans la bobine la lampe s'illuminait et l'ensemble se soulevait. (14)

L'expérience n° 2, considérée comme importante dans le traité de physique de Ganot (zd) illustre un effet de répulsion analogue à celui du moteur à induction. Sur une bobine à noyau de fer, on maintient un anneau coaxial en cuivre. Au moment où du courant alternatif est envoyé dans la bobine, l'expérimentateur ressent une force qui tend à repousser l'anneau vers le haut s'il le lâche. La force électromotrice dans l'anneau, figurée en pointillé, est décalée d'un quart de période par rapport au courant de la bobine.



zc Expériences électromagnétiques d'Elihu Thomson



Expériences d'Elihu Thomson - répulsion d'un anneau

Il en serait de même pour le courant si l'anneau était une simple résistance, le graphique montre qu'au cours d'une période, les attractions seraient égales aux répulsions entre le secondaire et le primaire. Mais la spire de l'anneau est inductive et déphase le courant. On remarque que la durée des attractions  $a$  est bien inférieure à la durée des répulsions  $r$ , en ajoutant que la valeur instantanée du courant  $y$  est plus élevée, d'où une force moyenne de répulsion importante, faisant de ce système un propulseur électrodynamique linéaire.

Ce montage de E. Thomson constitue aussi un moteur à induction linéaire, dont le champ inducteur a une direction constante et provoque dans l'induit un simple déplacement linéaire, pas une rotation. On peut imaginer par la pensée que la bobine soit remplacée par plusieurs bobines créant un champ tournant, qui induit un courant dans un bobinage ou une masse tournante, mise en rotation par la force de répulsion entre champ inducteur et courant induit. C'est le moteur à induction rotatif. (15)

L'idée de répulsion d'un anneau a donné à l'auteur, 80 ans plus tard, la solution pour concevoir un propulseur capable d'ouvrir en 2 millisecondes un disjoncteur 6000 A de puissance. (16)

Thomson exploita l'action répulsive révélée par ses expériences en courant alternatif pour construire divers appareils : mesureurs de courant, régulateurs de lampes à arc. Mais son apport important fut le moteur à répulsion, un type particulier de moteur alternatif monophasé.

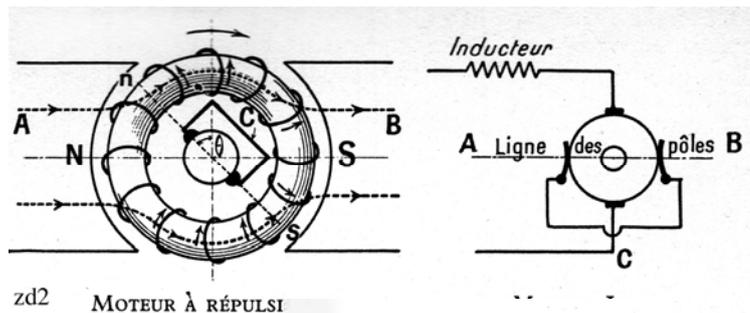
### Le moteur à répulsion

Son inducteur, semblable à celui d'un moteur en continu est alimenté en alternatif monophasé. Le rotor est un induit de moteur en continu, mais les balais du collecteur sont reliés entre eux formant un court circuit (zd2). Il se comporte comme un transformateur dont le primaire est l'inducteur, le secondaire le rotor court-circuité. Les courants induits dans le rotor font apparaître sur la ligne des balais des pôles de même sens que ceux du stator les plus proches. Il en résulte une répulsion provoquant la rotation. Par rotation de la ligne des balais, on peut faire tourner le moteur dans un sens, l'arrêter, puis dans l'autre sens.

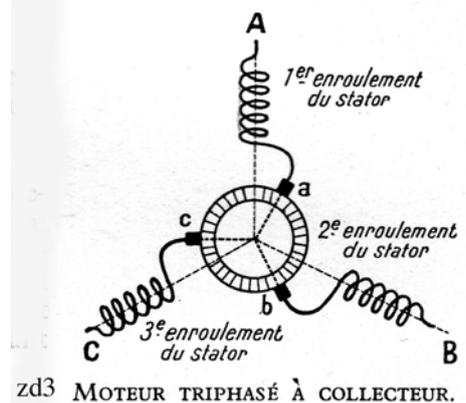
C'est un moteur robuste sans étincelles aux balais. Il a reçu quelques applications, mais surtout ce moteur a inspiré à d'autres, au début du XXe siècle, des variantes utilisées en particulier pour la traction électrique en alternatif mono-phasé.

Le moteur Latour datant de 1901 est un moteur avec inducteur en série fonctionnant par répulsion. Le rotor a quatre balais, deux pour la mise en série de l'inducteur, deux sont en court-circuit. Une autre variante a été étudiée en 1904 par Behn-Eschenburg, de la société suisse Oerlikon pour la traction des chemins de fer en 16 2/3 Hz. (IV-5)

Le moteur asynchrone polyphasé avait les grands avantages que nous savons, mais l'inconvénient de n'être pas facilement à vitesse variable comme le moteur continu. En lui remettant le collecteur dont on l'avait débarrassé, cela a permis de lui apporter cette qualité. (zd3) Le moteur triphasé à collecteur comporte un stator de moteur polyphasé et un rotor de dynamo en continu. Les trois balais réglables permettent de faire varier couple et vitesse. Il était peu utilisé et a disparu avec le réglage de vitesses des moteurs asynchrone, puis synchrone avec les thyristors.



zd2 MOTEUR À RÉPULSION



zd3 MOTEUR TRIPHASÉ À COLLECTEUR.

## Transformer l'alternatif en continu

Malgré la généralisation progressive de l'alternatif pour le transport et la distribution, nombre d'utilisations de courant continu subsistaient et l'une d'elles, l'électrochimie, connaissait un important développement. Pourquoi ne pas générer du continu directement à partir de l'alternatif venant d'une centrale lointaine, au lieu de l'obtenir sur place à partir d'un moteur mécanique à vapeur ou hydraulique.

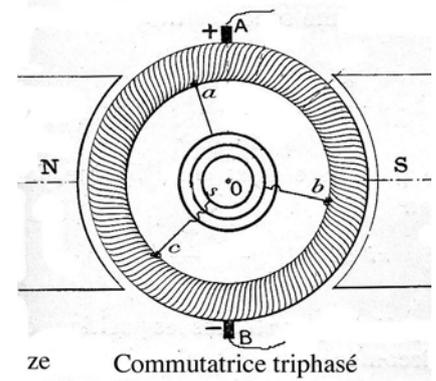
Plusieurs solutions apparurent au fil des années.

La solution la plus immédiate était d'entraîner une dynamo produisant le courant continu par un moteur alternatif asynchrone ou synchrone, mais cela nécessitait deux machines, solution parfois appliquée, mais coûteuse et peu pratique.

### Le convertisseur rotatif

Cette machine transformant l'alternatif en continu prit le nom de *commutatrice* à la fin du siècle. Dans la dynamo traditionnelle à courant continu, l'induit en anneau ou à tambour est parcouru par un courant alternatif, l'invention du collecteur consistait à le redresser, c'est-à-dire d'en faire un courant presque continu.

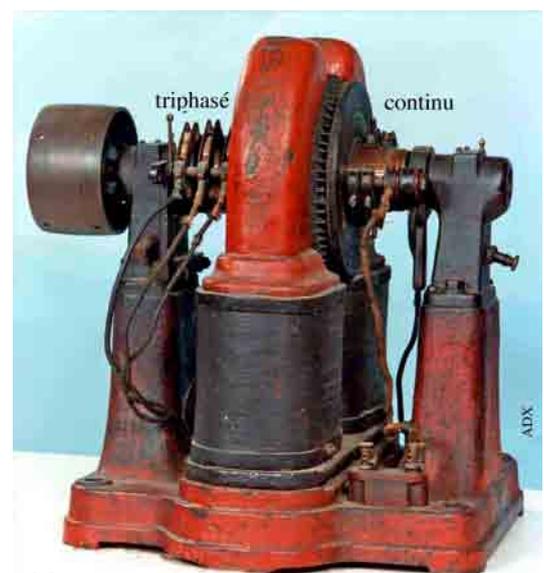
L'idée qui vint à plusieurs électriciens, cherchant à faire du continu à partir de l'alternatif, fut alors d'injecter cet alternatif en deux ou trois points de l'induit en les reliant à des bagues conductrices, sur lesquelles frottaient des balais connectés à la source d'alternatif. Sur le schéma (ze) les trois points de l'enroulement a-b-c à 120° sont reliés d'un côté de l'induit à trois bagues, sur lesquelles frottent trois balais connectés au générateur triphasé. De l'autre côté, le collecteur continu est simplement figuré par les deux balais A et B



Pour du monophasé il n'y a que deux bagues reliées à deux points diamétralement opposés de l'induit, pour du diphasé quatre bagues.

Cette solution étonnamment simple émergea presque naturellement comme une nouvelle application de l'universelle dynamo à courant continu, à la fois générateur, moteur, maintenant convertisseur réversible fournissant du courant continu à partir de l'alternatif, comme de l'alternatif à partir du continu

Il n'était plus nécessaire de faire tourner ce convertisseur avec un moteur mécanique puisque, aux pertes près, l'énergie consommée du côté continu était fournie du côté alternatif ou vice-versa. La machine Gramme (zf) du modèle *supérieur* fabriqué après 1885 comportait une poulie offrant la possibilité d'être une classique génératrice de courant continu, ou bien de courant alternatif. De même elle devient un moteur alimenté en courant continu, ou encore un moteur synchrone s'il est alimenté en alternatif. La dynamo Gramme s'est révélée une machine riche en possibilités, six utilisations possibles, la plus courante restant la conversion alternatif en continu



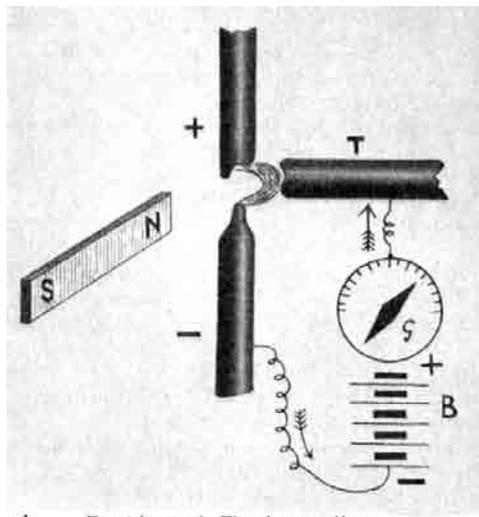
La commutatrice apparut un peu partout à partir de 1887, en France chez Gramme, aux Etats-Unis Bradley prit un brevet et construisit à Yonkers une usine pour leur production en 1890, rachetée ensuite avec le brevet par Général Electric. En Allemagne, Dolivo

Dobrowolsky présentait à l'exposition de Francfort une machine produisant du triphasé à partir du courant continu, utilisant l'induit à tambour Siemens. À côté, Schuckert exposait une machine proche mais générant du continu pour l'électrolyse à partir du diphasé. Lahmeyer présentait une machine du même genre mais originale par son double enroulement dans les mêmes encoches de l'induit, l'un en alternatif triphasé, l'autre pour du continu, redressé au collecteur. L'objectif était d'avoir coté continu une tension plus réduite que du côté alternatif. Cela évitait un transformateur.

Cette commutatrice devint une machine peut être plus répandue que la dynamo génératrice, pour la traction en particulier, tramways, chemin de fer et métro. Progressivement elle fut remplacée par les redresseurs, d'abord à vapeur de mercure, puis les redresseurs secs.

### Le redresseur à vapeur de mercure (16 b)

Après avoir observé en Amérique l'effet Edison, un faible courant traversant le vide d'une lampe à incandescence, resté inexpliqué, l'Anglais **Fleming** fit des expériences analogues sur des arcs électriques dans le vide et d'autres gaz. Il remarqua alors la conductivité unidirectionnelle de l'arc.



zh Expérience de Fleming sur l'arc

Un arc en courant continu est maintenu entre deux électrodes de charbon, puis dévié par un aimant pour aller toucher une autre électrode T (zh). En connectant suivant le schéma une pile avec un galvanomètre entre l'électrode négative et la troisième électrode, on constate que le galvanomètre dévie. Par contre si c'est le pôle positif de la pile qui est relié à l'électrode négative, il n'y a pas de déviation.

Fleming constata seulement le fait, qui s'explique pour nous par l'émission d'électrons par la cathode, attirés vers l'anode sous un potentiel suffisant pour générer un courant.

Dans le vide, le phénomène est amplifié, les électrons ne rencontrant plus d'atomes de gaz, mais il faut une différence de potentiel plus forte pour équilibrer la *charge d'espace*, constituée par le nuage d'électrons. Si l'on maintient dans le milieu un gaz raréfié, les ions positifs créés par les collisions avec les électrons vont équilibrer la charge des électrons et permettre de réduire le potentiel. Ainsi avec de la vapeur de mercure, il suffit de 20 à 30 V. Le mercure ayant surtout l'avantage d'être déjà liquide à la température normale, et de se vaporiser à basse pression.

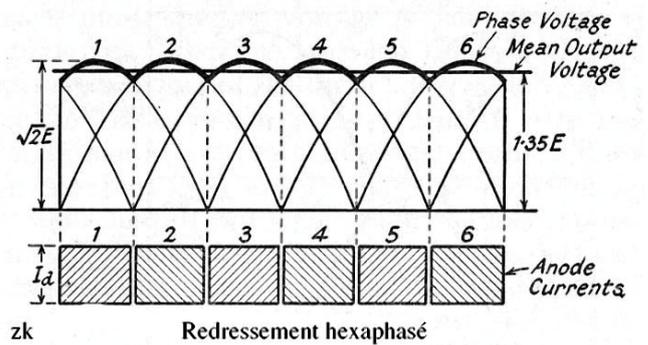
Il était prévisible que les travaux de l'américain **Cooper Hewitt** sur la lampe à décharge, dans la vapeur de mercure (III-3), le conduisent vers le redresseur sur le même principe en 1905. Un redresseur à vapeur de mercure est une chambre vide d'air, étanche, une grosse ampoule de verre au début, dans laquelle pénètrent une ou plusieurs électrodes, les anodes, au-dessus d'une petite quantité de mercure liquide au fond du récipient, constituant la cathode. (zj)



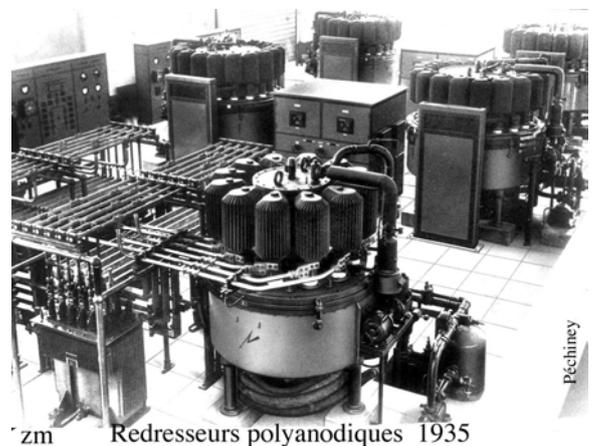
zj Redresseur hexaphasé en ampoule de verre

Alimenté en alternatif, seul le courant d'une demi alternance peut traverser de l'anode à la cathode, les électrons voyageant comme on le sait en sens inverse. Pendant le demi-cycle où l'anode est négative, les électrons sont repoussés, le courant ne passe pas, le comportement est celui d'une valve. La chute de tension interne est faible, 30 à 40 V, presque constante avec la charge, ce qui contribue à son bon rendement, 90% pour 300 V cc. ou 96 % pour 3000 V

Le nombre d'anodes dépend du nombre de phases, une en monophasé, trois en triphasé, six en hexaphasé préférable pour obtenir un courant presque continu faiblement ondulé (zk), à faible taux d'harmoniques. Cependant, on remarque sur la photo des anodes auxiliaires près de la cathode inférieure. L'une déclenche un petit arc pour l'allumage, l'autre évite l'extinction qui se produirait à moins de 10 A.



zl Redresseurs à vapeur de mercure



zm Redresseurs polyanodiques 1935

Les redresseurs en verre étaient construits pour des courants jusqu'à 500 A, et relativement fragiles. Au-delà, les deux sociétés américaines Général Electric et Westinghouse ont construit après 1910 des appareils avec une **cuve d'acier**, permettant d'atteindre dans les années 1930 des intensités de 16 000 A (zl), mais avec un système de refroidissement à eau. Les fabricants d'aluminium par électrolyse, procédé demandant de très fortes intensités en courant continu purent ainsi remplacer leurs coûteuses dynamos ou commutatrices par des redresseurs puissants (zm).

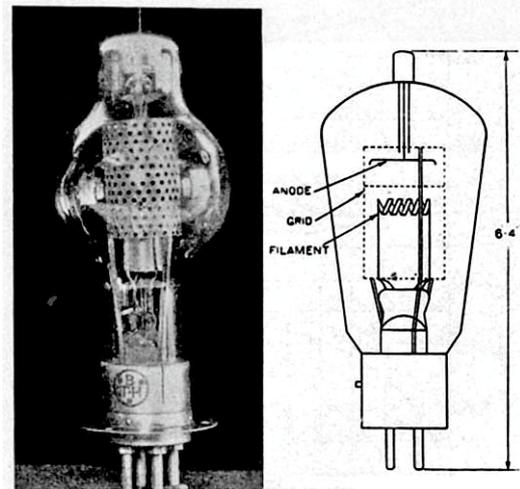
Un perfectionnement important proposé par Langmuir en 1914 fut le **grid control** ou contrôle de grille, qui venait d'être découvert dans la triode à vide. Une grille entourant l'anode est reliée à une borne extérieure et portée à une tension réglable de 50 à 300 V qui joue le rôle d'un filtre ou écran limitant le passage des électrons véhiculant le courant ou même le bloquant (17). Ce petit complément a ouvert de grandes possibilités : améliorer la stabilité de la tension continue de sortie - couper instantanément le courant sans avoir recours à un disjoncteur extérieur en cas d'autoprotection ou d'allumage en retour (back fire) - surtout, rendre réversible le système en générant du continu à partir de l'alternatif ou l'inverse. Le redresseur à vapeur de mercure a permis ainsi la transmission d'énergie en courant continu haute tension par câble sous-marin (IV-4).

Un autre perfectionnement notable a été l'invention d'un système hybride entre la triode à vide et le convertisseur à vapeur de mercure (à cathode chaude et grille), le premier véhiculant de faibles courants avec des tensions de milliers de volts, le second des milliers d'ampères avec de faibles chutes de tension.

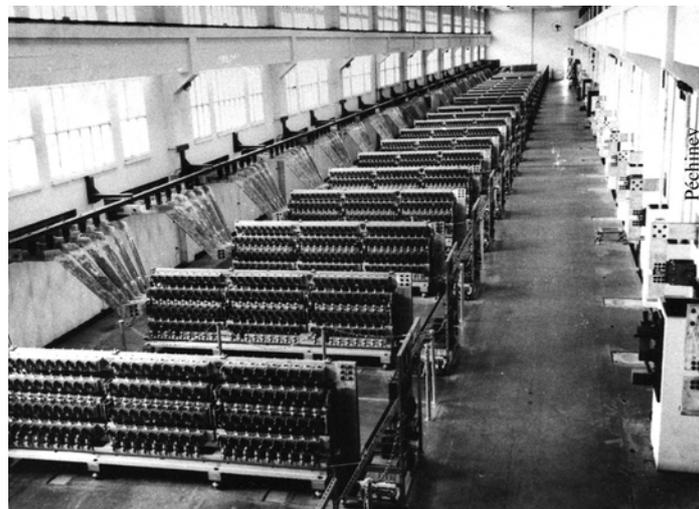
Cette ampoule avec une extrêmement faible pression de vapeur de mercure apparut vers 1928 et fut dénommée par Général Electric *thyatron*, signifiant *porte* en grec (zn). Il devint le *thyristor* dans la nouvelle technologie à semi-conducteur, vers 1965.

Le convertisseur à vapeur de mercure se muta aussi dans une autre variante, le *cycloconvertisseur*, capable de changer de l'alternatif triphasé à une fréquence donnée en monophasé à une autre fréquence.

Après 1935, ce convertisseur remplaça souvent la commutatrice, de même les machines à courant continu, génératrice et réceptrice pour des applications dans l'esprit du système Thury (ch. VIII-4).



zn Thyatron de Thomson Houston

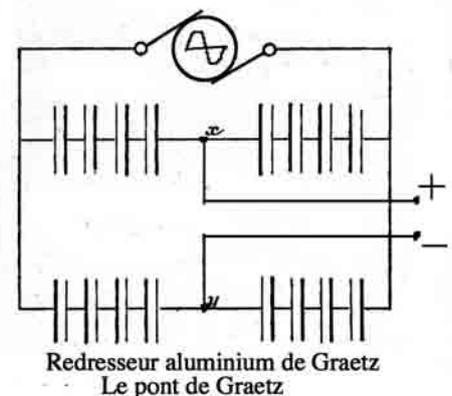


zp Redresseurs au silicium pour électrolyse - 1962

*Le redresseur sec*

D'autres procédés de redressement d'alternatif en continu étaient l'objet de recherches pour de faibles intensités et tensions, remplacer les piles. Un redresseur électrolytique fut breveté par Lilienfeld en 1920, mais les travaux de Pollak, Hutin, Graetz, Wilson pour trouver un redresseur sec intéressant n'aboutirent pas.

On peut simplement signaler la modeste capacité de redressement à 20 V d'un couple carbone-aluminium, innovant le schéma devenu classique, en *pont de Graetz*, du physicien allemand Léo **Graetz**.(zo). L'anode était en en alu, la cathode en charbon ou en fer.



On proposa plus tard un redresseur à oxyde de cuivre, mais il faudra attendre les semi-conducteurs en 1948 pour découvrir les possibilités du germanium, un peu faible sur la tenue en tension, puis la totale domination du silicium, qui remplaça aussitôt le convertisseur à vapeur de mercure (zp), comme la commutatrice

## Les très hautes fréquences

Les fréquences dites industrielles, 50, 60, 400 Hz ne sont pas restées cependant les seules utilisées. Des esprits curieux ont exploré des fréquences plus élevées, dont deux sont connus, Paul Oudin en France et Nikola Tesla en Amérique. Indépendamment, à la même époque, ils ont obtenu des courants à haute tension et haute fréquence par un assemblage, un peu différent pour chacun, constitué de transformateur sans fer, condensateur et éclateur alimenté par une bobine d'induction, ou de Ruhmkorff.

### Résonateur de Oudin

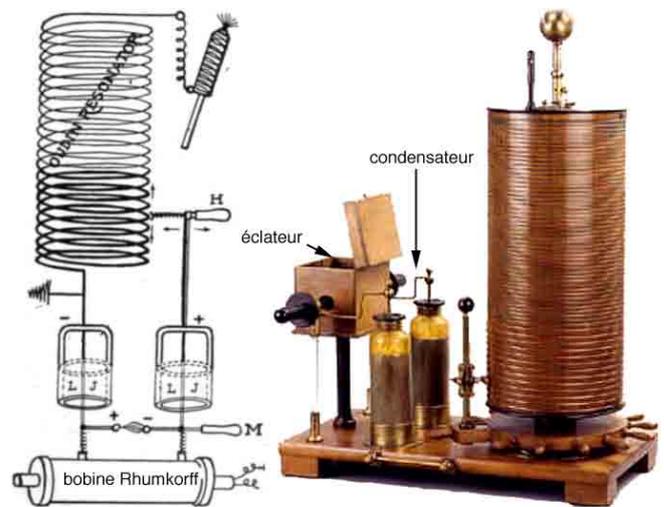
En tant que médecin Oudin connaissait bien cet appareil médical répandu dans le public, une petite bobine d'induction dont le courant à haute fréquence était appliqué sur des parties du corps à soigner (ch.III-4). Son collègue Arsène d'Arsonval l'utilisait en mettant en série une bobine. Pensant à la propriété d'élévation de tension du transformateur récemment apparu, il ajouta une seconde plus petite enfilée sur la première, comme dans la bobine d'induction, et connecta l'ensemble pour constituer un auto-transformateur.

On savait que des courants à haute fréquence ne pénétraient pas à l'intérieur des conducteurs, circulant uniquement à leur surface, par suite de l'*effet de peau* ou effet Kelvin, nouveau nom de W. Thomson, qui l'avait expliqué en 1887. C'était aussi le cas du corps humain, comme l'utilisation sans danger de la bobine d'induction le prouvait pour échauffer certaines parties par *diathermie*.

Oudin conçut son appareil probablement vers 1892 et E. Ducretet le fabriqua en 1893. (zq) Il le breveta en France en 1897.



Zf Poste à galène de marque «Oudin»



Résonateur de Oudin - E. Ducretet - 1895

L'éclateur aux bornes de la bobine d'induction transmet au condensateur des trains d'oscillations à haute fréquence qui circulent dans le circuit formé par les condensateurs et le primaire de l'autotransformateur. Ce primaire est ajustable par un curseur pour accorder la fréquence propre de l'auto transformateur sans fer, à celle de la décharge oscillante du condensateur et les mettre en résonance.

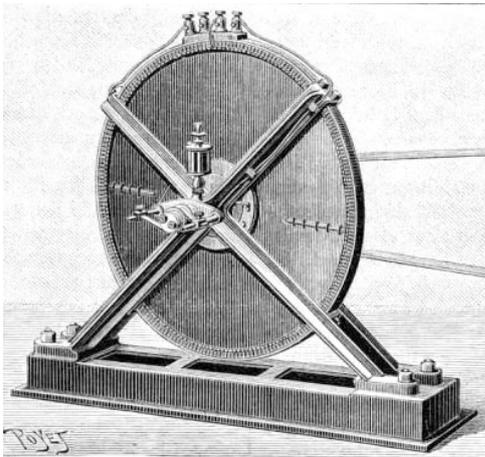
Le principe de ce résonateur est identique à celui du transformateur de Tesla ci-après.

Le système Oudin, était à l'origine, uniquement destiné à des applications thérapeutiques, mais il se trouva bien adapté aux récepteurs du début de la TSF, en particulier pour les récepteurs à cristaux de galène. (zr)

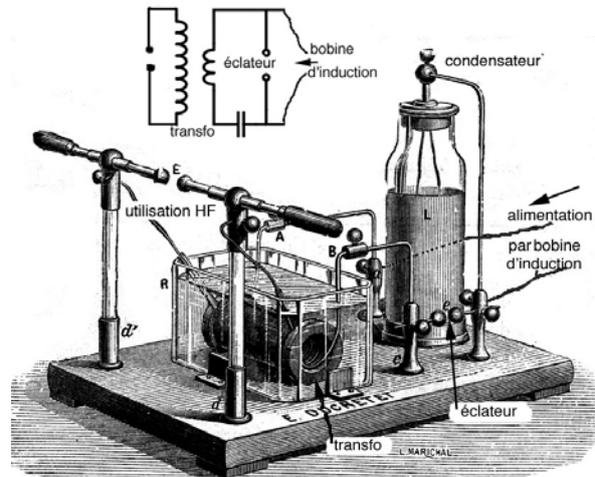
### Transformateur résonant de Tesla

Après avoir contribué en Amérique au développement de l'alternatif par rapport au continu, son imagination fertile a dû l'inciter à aller plus loin encore, dans l'exploration du domaine des hautes fréquences. D'autre part son intérêt pour les travaux de W. Crookes sur les luminescences dans les tubes de gaz raréfiés, l'ont incité à y chercher un nouveau système d'éclairage, supérieur à la lampe à incandescence de son antagoniste Edison.

Pour produire les hautes fréquences nécessaires, à tension élevée, Tesla construisit d'abord un l'alternateur à 584 pôles, tournant à 5000 t/min, produisant du 10 000 Hz (zs). Ce n'était pas très pratique pour des démonstrations, il chercha alors à renforcer la tension recueillie aux bornes de l'éclateur d'une bobine d'induction avec un *transformateur résonant* (zt).



zs Alternateur Tesla haute fréquence 10 kHz

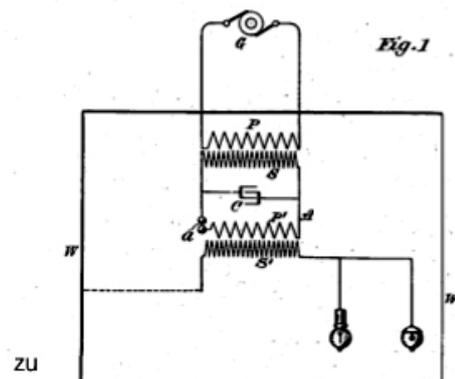


zt transfo résonant Tesla - par Ducretet

**La La résonance aux hautes fréquences** s'est trouvé un moyen judicieux pour amplifier la tension plus fortement que ne le ferait le couplage magnétique secondaire/primaire d'un transformateur classique. Le courant à la sortie de l'éclateur d'une bobine, sous forme de décharges oscillantes amorties, charge un condensateur. Quand la tension instantanée atteint un certain niveau, elle déclenche l'amorçage d'un autre éclateur - e- dont les bornes sont reliées au primaire d'un transfo. Ce transfo sans fer a un couplage magnétique lâche entre primaire et secondaire. Il est immergé dans l'huile pour tenir à la tension élevée du secondaire. On cherche à déterminer le nombre de spires et la longueur de fil du primaire pour ajuster ses caractéristiques, inductance, capacité et résistance afin d'obtenir la résonance avec le circuit secondaire pour la fréquence des décharges de l'éclateur. La tension élevée au secondaire est obtenue à la fois par le couplage magnétique, d'ailleurs inférieur au rapport des nombres de spires, très augmentée par le coefficient de surtension résultant de la résonance.

Le premier brevet US pris par Tesla, qui utilisait ce transfo pour alimenter l'éclairage HF, date de 1891 (zu). Il améliora ensuite les performances du système en remplaçant la bobine d'induction par un générateur alternatif alimentant un transfo élévateur. De même l'éclateur par d'autres systèmes électromécaniques d'interruptions rapides (18).

N. TESLA.  
SYSTEM OF ELECTRIC LIGHTING.  
No. 454,622. Patented June 23, 1891.



zu

Les deux appareils sont très proches, exploitant le même principe, mais l'auto-transformateur de Oudin était moins puissant. Vraisemblablement les deux inventeurs s'ignoraient. Oudin ne s'intéressait qu'à l'application thérapeutique. C'est par hasard que son appareil répondit bien à l'un des problèmes de la TSF, comme celui de Tesla.

Ce dernier était destiné à l'éclairage et se trouva par la suite un moyen envisagé par Tesla pour transporter l'énergie sans fil.

### Éclairage à haute fréquence

En 1891, Tesla prononçait à l'AIEE une brillante conférence, l'un de ses talents : *Experiments with Alternating Currents of high Potential and high Frequency*. Elle était accompagnée d'expériences étonnantes d'allumage de lampes à gaz raréfiées, tubes de Geissler (III-3), tenues à la main avec un seul fil, ou même sans fil (zv). Ces démonstrations proches de la magie reposaient sur deux propriétés peu connues des hautes fréquences :

- ces courants sont inoffensifs pour le corps, circulant à la périphérie de la peau
- ils circulent pratiquement sans fils entre les armatures de capacités dans l'air, par induction électrostatique (19).

Cette conférence renouvelée l'année suivante en Angleterre et en France connut un grand succès devant des aréopages d'électriciens et scientifiques. C'était très spectaculaire, mais la complication de l'alimentation ne permettait pas à cet éclairage à haute fréquence d'être exploité.

### Générateurs de très hautes tensions

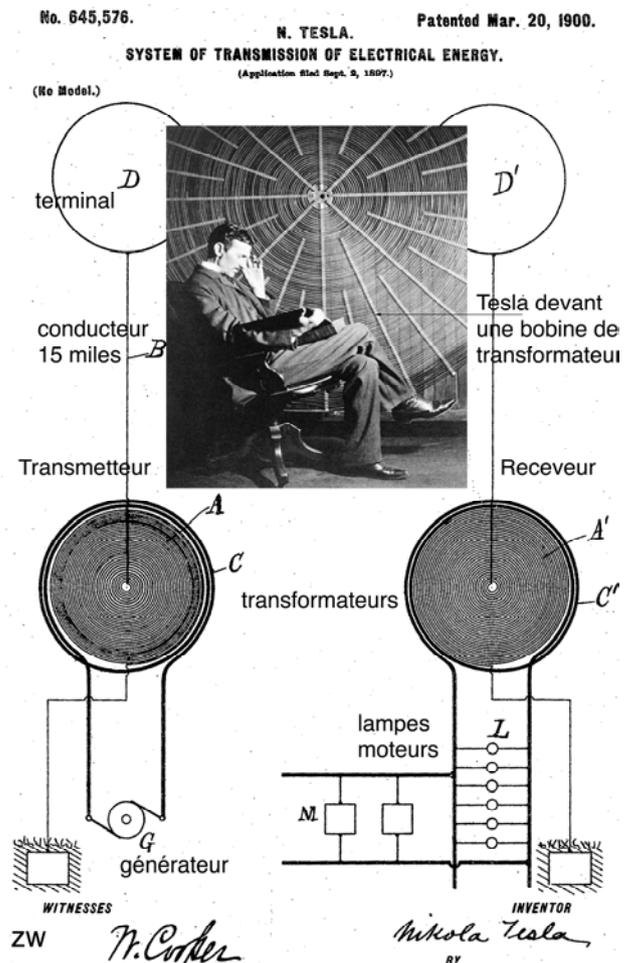
La bobine de Tesla pouvait être conçue pour obtenir au secondaire une tension atteignant le million de volts et plus, moins dangereuse en raison de sa haute fréquence. Elle est encore adoptée par des amateurs, à titre ludique ou décoratif (voir web), car les laboratoires industriels spécialisés n'ont besoin que de très haute tension à fréquence normale de 50 Hz.

### Transport d'énergie électrique sans fil

Comment cet extravagant projet est-il venu à l'idée de Tesla ? Peut être son besoin permanent d'étonner, de faire mieux et plus que les autres, qui à cette époque cherchaient à transporter seulement l'information avec les nouvelles ondes de Hertz ? Lui,



ZV Conférence de Tesla à la Société internationale des électriciens - 1892



transporterait l'énergie au loin, sans les fils qui

commençaient à tisser leur réseau sur l'Amérique, sans les ondes qui se dispersaient partout. Il avait inventé l'outil de base, capable de transformer l'énergie du courant alternatif en très hautes tensions à très hautes fréquences. Cette énergie serait transportée sans fil par deux conducteurs, la terre et les couches atmosphériques conductrices de haute altitude.

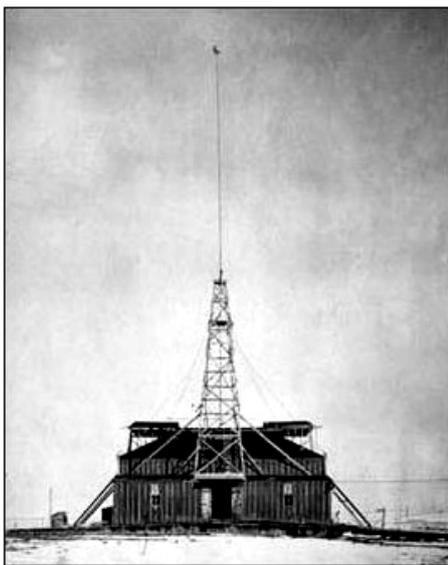
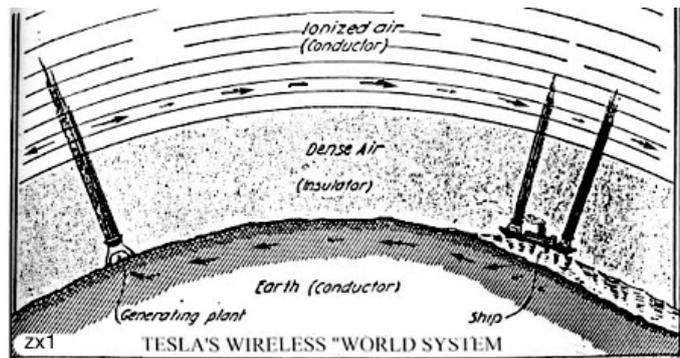
L'évolution de ses réflexions se retrouve dans ses brevets (20) : En 1894, il perfectionne son transfo, d'abord avec des bobines enroulées en spirales pour accroître leur capacité propre, il améliore aussi la technologie du condensateur ; ensuite en 1896/97 il remplace l'éclateur, générateur de haute fréquence, par différents systèmes électromécaniques de hachage ultrarapides de courant.

Le brevet US 593138, *Electrical Transformer*, présente le transformateur avec ses grandes bobines coniques où le ruban de cuivre est enroulé en spirales. La puissance est transmise par un seul fil aérien à très hautes tension et fréquence, l'autre fil est la terre.

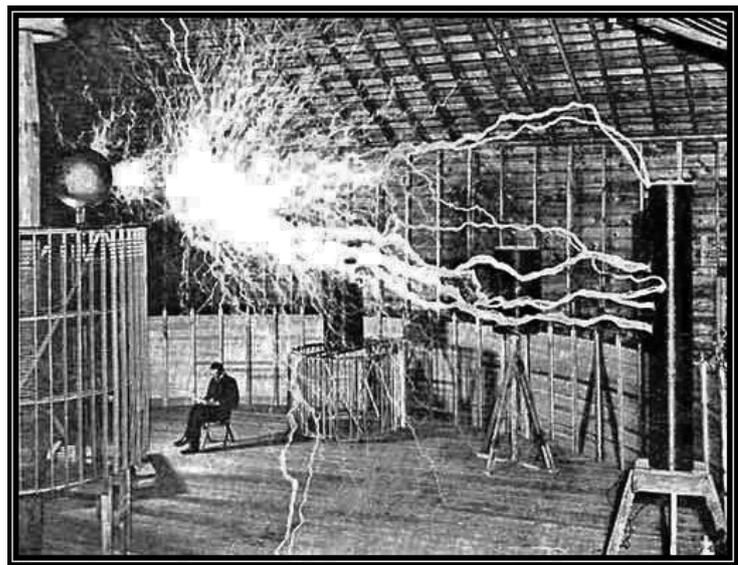
Le brevet 645,576 déposé en 1897 et accordé en 3/1900 est la synthèse des précédents. Il décrit ce *System of Transmission of Electrical Energy* (zw). Les deux bobines coniques du transformateur A et C sont ont près de 4 m de diamètre. Tesla est photographié devant cette bobine. Les deux *terminal* sont des plaques de grande surface, reliées aux transformateurs par un très long fil, et suspendues à des dizaines de miles d'altitude par des ballons.

Tesla précise p.5 :

*La description concerne principalement une méthode et un système de transmission d'énergie par un moyen naturel pour applications industrielles, ils peuvent avoir beaucoup d'autres usages - tel que transmettre des messages à grande distance - ou illuminer les couches supérieures de l'air - ou de modifier les conditions atmosphériques - ou fabriquer à partir des gaz des produits comme l'acide nitrique, des engrais et bien d'autres choses...(zx1)*



zx2 Laboratoire Tesla - Colorado Springs - 1899



zx3 Tesla observe les décharges à très haute tension dans son laboratoire

A remarquer qu'il ne s'agit nullement d'ondes hertziennes, confusion fréquente pour trouver en Tesla l'inventeur de la radio... parmi bien d'autres !

Pour tester ce système extraordinaire, Tesla installa en 1899, à Colorado Springs, une station d'essais à 1800 m d'altitude, où l'air assez raréfié serait meilleur conducteur. (zx2) Le pylône de 44 m était surmonté d'une boule métallique censée diffuser le courant HF dans l'atmosphère. Il recevait l'énergie de la centrale du village voisin et consommait normalement 15 kW ; un jour, il surchauffa néanmoins l'alternateur qui brûla. L'objectif était de produire de fortes décharges lumineuses avec son transformateur résonant de grande puissance, telles que l'illustre cette impressionnante photo (zx3) très diffusée à l'époque, en oubliant de signaler qu'elle résulte d'expositions successives, Tesla n'était pas suicidaire. Il n'est guère possible de savoir ce qu'apportaient ces essais, où le courant HF allait-il dans l'air ionisé ? Comment revenait-il par la terre ?

M. Cheney remarque : *Les notes quotidiennes de Tesla se réfèrent constamment à des expériences qui ne s'étaient pas déroulées comme prévu, il ne savait pourquoi.*

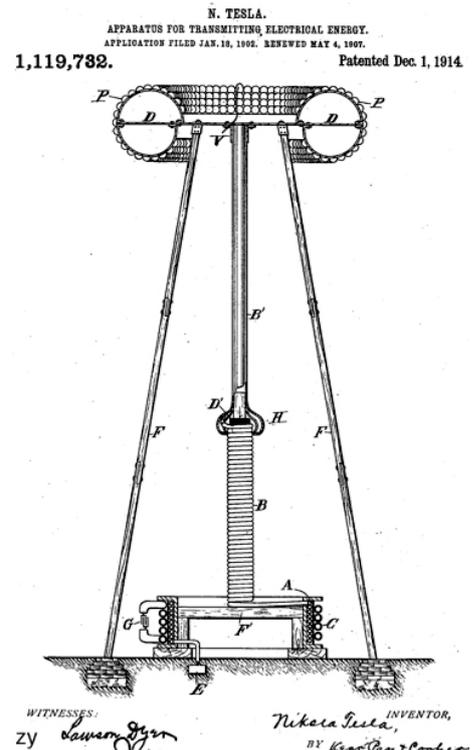
Des signaux insolites ont été reçus, Tesla pensait qu'ils venaient de Mars où les habitants avaient peut être détectés ses essais.

La dernière étape sera la réalisation d'une grande tour d'émission d'énergie décrite dans le brevet US 1,119,732 déposé en 2/1902, mais délivré en 12/1914 (zy). Tesla déclarait qu'il lui sera possible d'envoyer depuis cette tour de l'énergie au monde entier, avec de très faibles pertes, *en utilisant la terre comme conducteur résonant*. A partir de 1900 Tesla chercha des investisseurs pour son projet de tour, son ami Westinghouse éluda habilement, il finit par obtenir du grand banquier Pierpont Morgan la promesse de \$150 000. Mais sans trop lui parler de son projet réel consistant à transmettre de l'énergie électrique à haute tension et fréquence, recueillie n'importe où dans le monde par n'importe qui, sans payer – Morgan n'était pas un philanthrope.

Il utilisa alors un subterfuge verbal. Partout on suivait avec attention les progrès de Marconi dans la transmission d'information par les ondes de Hertz. Tesla, que cet objectif n'intéressait pas, déclarait aux journaux que son procédé permettrait de transmettre, sans fil dans le monde entier, des messages aussi bien que de l'énergie. Il emporta finalement l'accord de Morgan sur cette promesse.

Les travaux démarrèrent en 1900 pour construire à Wardenclyffe, au bout de Long Island, cette tour - laboratoire avec un générateur de 300 HP Mais en décembre 1901 arriva la nouvelle de la première transmission au dessus de l'Atlantique d'un signal télégraphique par TSF (*wireless* - on ne parlait pas encore de radio), organisée par Marconi.

Tesla n'en ressentit probablement pas de dépit ni de jalousie, car il ne jugeait pas intéressant la transmission d'information sans fil, uniquement comme un complément de celle de l'énergie, beaucoup plus difficile et importante à ses yeux. Ce fut pourtant l'amorce de son déclin professionnel. En effet, Morgan réalisa qu'il s'était trop engagé sur le projet fantastique mais ruineux de Tesla, alors que Marconi commençait à résoudre le transport de



zz

Tour émettrice de Tesla à Wardenclyffe

l'information à travers l'Atlantique avec deux caisses de matériel et un cerf-volant au bout d'un fil métallique. Il fit savoir à Tesla qu'il n'aurait pas un dollar de plus.

La tour de Wardencllyffe inachevée en 1903 fut détruite en 1917, le terrain revendu par le propriétaire du Waldorf-Astoria Hôtel, pour compenser un peu les dettes princières de son fidèle client.

La TSF puis la radiophonie, la télévision, ont progressivement transporté l'information avec les ondes hertziennes se propageant dans le vide, de nature totalement différente des courants de Tesla à haute fréquence et très haute tension, véhiculés par la terre et l'ionosphère. Pourtant Tesla ne cessait de déclarer dans la presse la possibilité de transporter sans fil dans toute l'Amérique la puissance du Niagara.

Les ingénieurs ordinaires, ne possédant pas le génie de Tesla persistent néanmoins depuis un siècle à transporter l'énergie par l'électricité à 50 ou 60 HZ, toujours dans des fils.

C'est dommage que l'intelligence probable de Tesla, conjuguée avec de bonnes connaissances en l'électricité, soit restée si peu productive. Son orgueil immodéré et besoin d'étonner l'ont amené à des extravagances de prestidigitateur, décevantes pour son image de scientifique, cette tour de Wardencllyffe et ses contacts avec les martiens.

## Compléments

### 1-Analogie hydraulique

Cette comparaison de l'électrocinétique avec l'hydraulique, classique en continu, devient difficile en alternatif avec les inductances et capacités. Pourtant le physicien Georges Claude, a fort bien transposé, au début du 20<sup>e</sup>, l'analogie hydraulique aux circuits avec inductances et capacités en alternatif dans son livre de vulgarisation : *L'électricité à la portée de tout le monde* - Dunod, Paris 1902. G. Claude a principalement industrialisé la liquéfaction de l'air, dont les « sous-produit », les gaz rares, argon krypton, néon, se sont révélés très intéressants pour l'éclairage. Il a aussi inventé et essayé la transformation en électricité de l'énergie thermique des mers chaudes ETM. (II-5)

2 - L'**impédance** est plus exactement : 
$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2}$$

pour tenir compte aussi de la capacité C qui déphase le courant en avant de la tension. Mais il s'agit de la capacité en série du circuit qui est en général négligeable, qu'il ne faut pas confondre avec la capacité parallèle, élevée en particulier dans les câbles. Cette capacité des câbles résulte à la fois des capacités entre conducteurs proches et de leurs capacités par rapport à la terre, ou la mer. Elle intervient sous forme d'un courant capacitif d'échange d'énergie dite *réactive*, entre les inductances série et les capacités parallèles du réseau.

Le terme anglais d'*impédance* a été créé par Oliver Heaviside dans les années 1885/1888, ainsi que : *inductance* - *admittance* - *conductance* - *permeability* - *permittance*.

Ce livre n'a pas vocation d'un manuel d'électricité, mais se limite à expliquer les laborieuses découvertes des premiers électriciens, concernant ce qui est devenu banal pour l'électricien d'aujourd'hui.

### 3 - Harmoniques

Lorsqu'une grandeur périodique est déformée, n'est donc plus sinusoïdale, Fourier a démontré par sa décomposition en série, que cette grandeur était alors la somme instantanée de plusieurs grandeurs elles-mêmes sinusoïdales, de fréquences multiples de la fréquence fondamentale, celle de la grandeur déformée. Ces différentes grandeurs sinusoïdales sont dénommées *harmoniques* de rang 2,3,4,5... . Leur amplitude décroît avec leur rang, elles peuvent être négligées au-dessus du rang 11. Les harmoniques pairs sont généralement nuls. Dans les réseaux triphasés, l'harmonique 3 est caractéristique et peut se propager par la mise à la terre. Les harmoniques provoquent diverses perturbations et pertes. Ils sont provoqués généralement par les matériels des usagers, qui se comportent

comme des générateurs de courants harmoniques. Les distributeurs les limitent par les normes pour éviter une pollution générale des réseaux, sous forme de tensions harmoniques perturbatrices.

Voir : *Les harmoniques dans les réseaux* – André Ducluzaux, Cahier technique Merlin Gerin n°34, 3/1978 ou documents ultérieurs.

Dans le cadre de l'organisation de la communication technique du constructeur d'appareillage de réseaux Merlin Gerin, j'avais créé en 1975 une collection de « *Cahiers techniques* » pour apporter au monde des électriciens et étudiants les connaissances spécifiques de la maîtrise des réseaux électriques, peu enseignées dans les Ecoles. Ils étaient rédigés par des ingénieurs, spécialistes de domaines particuliers. La société Merlin Gerin ayant été absorbée en 1992 dans le nouveau groupe Schneider Electric, les cahiers techniques, plus d'une centaine, ont continué avec reprise et mise à jour des anciens documents. Voir pour téléchargement : [schneider-electric.fr](http://schneider-electric.fr) - support – cahiers techniques.

**4 – Effet de peau** – Cet effet en courant alternatif avait été détecté par W. Thomson puis étudié par Gaulard en 1882. Voir : André Ducluzaux, *Pertes par effets de peau et de proximité*, Cahier technique MG n°83, ed. Merlin-Gerin, Schneider, 1/1977,

**5 - Amortisseurs Hutin et Leblanc.** Ce sont de grosses tiges en cuivre traversant les noyaux inducteurs et mis en court-circuit des deux cotés. Elles constituent une sorte de cage d'écureuil où se développent des courants induits s'opposant aux variations éventuelles du champ inducteur.

Maurice Hutin et Maurice Leblanc, généralement associés dans leurs travaux, étaient des assez rares français à réaliser nombre de perfectionnements aux machines en alternatif, en particulier le moteur asynchrone monophasé à partir de 1889.

**6 – Pyralène – PCB** - Ces interdictions ont été suivies par les constructeurs de transformateurs et de condensateurs électriques, mais on constata qu'ils n'avaient utilisé que probablement 60 % du pyralène produit par les usines chimiques. Le reste était utilisé dans nombre d'autres produits : lubrifiants, encres d'imprimerie, fluides hydrauliques, navires méthaniers, radiateurs d'appartement dits « à huile », peintures, même des cosmétiques.

Des accidents en Extrême-orient révélèrent que ce pyralène à froid, même non dissocié à chaud en dioxine, pouvait aussi être dangereux pour l'homme en provoquant divers problèmes. D'un usage très limité au contact de l'homme, aucune étude de toxicité n'avait été faite, en l'absence de maladie professionnelle constatée en un demi-siècle. Il y avait probablement, avant l'interdiction, un peu de pollution en milieu naturel ou dans les décharges, due aux utilisations non électriques, les électriciens n'ayant pas intérêt à le jeter, le produit étant facilement réutilisable. Mais l'interdiction a déclenché une certaine panique, classiquement amplifiée par effet médiatique, nombre d'utilisateurs, autres que les propriétaires de transformateurs, se sont alors débarrassés de leur pyralène dans des décharges sauvages, ce qui a dû accroître fortement une faible pollution antérieure par simple négligence.

**7- La surexcitation** du moteur synchrone a permis de remédier dès le début de l'alternatif au problème de la consommation d'énergie réactive par les inductances, laquelle diminuait le *facteur de puissance*. On installe encore des moteurs synchrones surexcités tournant à vide, uniquement pour *compenser* ce mauvais facteur de puissance d'un réseau, (trop inférieur à 1), débitant sur trop de circuits inductifs. Ce sont des *compensateurs synchrones*. Remarquons au passage que tout alternateur peut jouer ce rôle, s'il est prévu avec la possibilité de surexcitation. Cette compensation a été par la suite réalisée de préférence par des batteries de condensateurs statiques, plus économiques, branchés automatiquement en dérivation sur les réseaux.

## 8 – Bibliographie sur le moteur asynchrone

### - générale

- Silvanus Thompson – *Courants polyphasés – traduction* Boistel ed. Béranger, Paris, 1895 – 1901. Sans doute l'une des meilleures références.

- E. Arnold, J.L Lacour – *Les machines asynchrones* – traduit de l'allemand – Delagrave, Paris, 1912

- PL. Alger and RE. Arnold –*The History of induction Motors in America* – Proc. IEEE vol 64, n° 9, 9/1976

- Franz Hillebrand –*Zur Geschichte des Drehstromes* –ETZ-A Bd80, H13, 1/7/1959

- Hubert Rothert –*Die Bedeutung der Käfigwicklung* ...ETZ-A, Bd 91, H1, 1970

#### - Ferraris

- Mémoire de Ferraris, - La Lumière électrique T.16 - n°22, 30/5/1885 p.397 - n° 23 p.460 - n°25 p.551 - n°26 p.602- URL [cnum.cnam.fr](http://cnum.cnam.fr)

#### - Tesla

- Nikola Tesla –*My Inventions* – Autobiography de N.Tesla, New York 1995

- T.C. Martin –*Inventions, Researches and Writings of Nikola Tesla* – New York 1894 – ETZ Berlin 1891 S382 – Journal IEE London 1892 p.51 – Electrical Engineer

- Margaret Cheney - *Tesla, la passion d'inventer*, Belin, Paris 1987. Traduction de *Tesla : Man Out of Time* by Margaret Cheney. Postface de J. Cazenobe, CNRS

- Musée Tesla à Beograd Serbie, URL [tesla-museum.org](http://tesla-museum.org)

#### - Dolivo Dobrowolsky

- Gerhard Neidhöfer: *Michael von Dolivo Dobrowolsky und der Drehstrom*. Geschichte der Elektrotechnik Volume 9, VDE VERLAG, Berlin Offenbach

**9 - Champ tournant.** On trouve sur internet plusieurs montages animés, visualisant la formation de ce champ. En particulier : [valery.bruniaux.chez-alice.fr/ChampsTournants/ChampTournant.htm](http://valery.bruniaux.chez-alice.fr/ChampsTournants/ChampTournant.htm)

**10 – Brevets de Bradley** – Celui du 8/5/1887- n° USA 390 439 a été accordé et publié le 2/10/1888. Celui du 5/10/1888 – n°404465 a été accordé le 14/6/1889. Celui du 20/10/1888 – n°409450 a été accordé le 20/08/1889. La date de priorité d'un brevet est la date du dépôt, mais la publication ne se fait normalement qu'après la date d'accord du brevet.

Les anciens brevets US sont accessibles sur le site du *Patent Office*.

**11 - Théorie des machines.** Pratiquement toutes les machines électriques ont été inventées avant que leur théorie soit établie. Ce n'est qu'ensuite, pour les améliorer, que des théoriciens cherchaient à mieux en comprendre le fonctionnement. Leur outil était le calcul, souvent difficile ou impossible en particulier pour le champ magnétique dans le fer plus ou moins saturé. On s'en sortait avec des constructions graphiques permettant d'extrapoler des réalisations existantes.

Le volumineux *computer* des années 1960, une super machine à calculer avant de devenir un outil de gestion, l'ordinateur, a été une révolution permettant des calculs inaccessibles « à la main » par leur longueur. La première machine électrique construite avec un programme de calcul a été la plus simple, le transformateur statique. Par contre la plus complexe a été la machine asynchrone, moteur ou générateur. Je crois que l'un des rares appareils encore rétifs à la mise en équations d'un modèle mathématique reste le disjoncteur ; l'arc électrique, base de son fonctionnement étant très difficile à modéliser en termes mathématiques.

**12 - Dobrowolsky** a-t-il appliqué le principe de Ferraris ou celui de Tesla ?

En Amérique, beaucoup d'admirateurs de Tesla considéraient que c'était lui et non Ferraris qui était l'unique inventeur du moteur asynchrone. Ils s'appuyaient sur une lettre que C.Brown avait publié dans *L'Electrician* du 23/10/91 « les brevets antérieurs de M. Tesla décrivent clairement le système employé dans les expériences de Francfort ». C'était exact, mais ils n'ont été accordés et publiés que le 1/5/1888, de même que les maquettes de Ferraris de 1885 n'ont été connues, qu'un peu avant sa communication du 15/4/88, soit un mois avant. Chacun des deux co-inventeurs ignorait certainement les travaux de l'autre, l'un ayant adopté un induit massif et l'autre un induit bobiné, ce qui les différencie nettement. Il est invraisemblable que Dobrowolsky ait adopté le principe de Tesla et simultanément repris l'induit massif de Ferraris avec le même principe. D'autant plus que Ferraris donnait en 1888 une

première théorie détaillée du moteur, avec ce rendement de 50% que contestait précisément Dobrowolsky, alors que Tesla ne donnait dans sa conférence qu'une description, sans aucune explication théorique sur sa découverte. Cette querelle de priorité, non fondée, avait en réalité une autre raison d'ordre financier. L'intention de Brown était de suggérer que le moteur AEG de Dobrowolsky, dont seul l'induit en cage était breveté, était une copie du principe de Tesla et non de celui Ferraris, lequel était dans le domaine public. Le brevet de Dobrowolsky n'aurait donc pas été valide, ce qui aurait permis à Brown de le copier librement, alors qu'en 1889 AEG avait accordé à Oerlikon une licence, mais payante, pour construire ce moteur.

Peu après, Brown quittait Oerlikon pour créer Brown Boveri et commençait à fabriquer dès 1891 des moteurs, probablement sans licence d'AEG.

**13 - principe du moteur asynchrone monophasé :** Hutin et Leblanc - *Lumière Electrique* 30/05/1891. G. Ferraris, *Un metodo per la trattazione dei vettori rotanti od alternativi ed una applicazione di esso motori elettrici a correnti alternate* – Mémoires de l'académie de Turin 12/1893 – *The electrician* 1894 – *Lumière électrique* 24/02/1894.

**14 –Elihu Thomson,** *Nouveaux phénomènes dus aux courants alternatifs* – *Electrical World*, IV, p.258, 27/5/1887 New York. E.Hospitalier, *Répulsions et rotations électrodynamiques* – *La Nature*, n°844, 3/8/1889 Paris

**15 - Moteur asynchrone linéaire.** Un moteur asynchrone linéaire a été développé et testé dans les années 1970 par la société Merlin Gerin pour propulser à 400 km/h l'aérotrain, train à coussin d'air pour grande vitesse, étudié par Jean Bertin initialement avec un moteur d'avion à hélice puis turboréacteur. Sa technique découlait d'un ancien brevet de 1895. L'induit était un rail fixe central, l'inducteur était solidaire du véhicule. Divers problèmes politiques, techniques et économiques ont fait abandonner ce premier projet de train à grande vitesse, soutenu par l'État (DGRST) jusqu'en 1975, et ce malgré sa validation sur des prototypes. D'autres solutions, notamment cryogéniques ont été ensuite étudiées en Allemagne au Japon et en Chine (Transrapid, Maglev), elles aussi validées mais difficiles à développer économiquement.

Mais la technologie classique du train sur rails à moteur électrique rotatif en courant continu a pu finalement être finalement perfectionnée pour atteindre les grandes vitesses, avec le TGV et systèmes proches. Le moteur série à courant continu initial a été remplacé ensuite par le moteur alternatif asynchrone ou synchrone, commandé par l'électronique de puissance.

**16 – Cette expérience de Thomson** m'a donné le principe d'un propulseur puissant, donc ultra rapide pour concevoir à Merlin Gerin en 1978 un *Disjoncteur ultra rapide à effet Thomson - DURT*, Il avait déjà un système contrôle et commande électronique. Comme le moteur linéaire ci-dessus, il empruntait une idée vieille d'un siècle, qui n'avait pas été développée. Parmi ces inventions de sources anciennes, restées inexploitées, on peut aussi mentionner la bien connue pile à combustible ou pile à gaz de Grove (1839), redécouverte par la NASA. L'histoire des techniques peut être source d'innovations. Un dicton auvergnat : « C'est dans les vieilles marmites qu'on fait la meilleure soupe »

**16 b–** H.Rissik, *Mercury-arc current convertors* – Isaac Pitman, London 1941-1963

**17– grid control** – Cette grille de contrôle est l'équivalent de celle de la **triode à vide**, inventée par Lee de Forest en 1906, invention capitale que Cooper Hewitt a transposée. Les deux tubes, soit à vide, soit à arc dans la vapeur de mercure, fonctionnent très différemment. Le tube à vide ne véhicule que des électrons libres dont le courant est limité à quelques ampères par la **charge d'espace** négative des électrons (un électron émis serait comme repoussé par le nuage de ceux qui le précèdent). Par contre dans un gaz à basse pression comme la vapeur de mercure, le courant passe dans un arc constitué d'ions positifs du mercure en quantité égale (à un instant donné) aux électrons dont la charge d'espace négative est ainsi équilibrée, permettant au flot d'électrons d'atteindre des milliers d'ampères. Le courant inverse dû aux ions est infime compte tenu de leur masse, très supérieure.

**18 – Le transformateur résonant de Tesla**, est utilisé aujourd'hui comme élévateur à de très hautes tensions et très hautes fréquences. Voir **Bobine Tesla** Wikipédia.fr et autres.

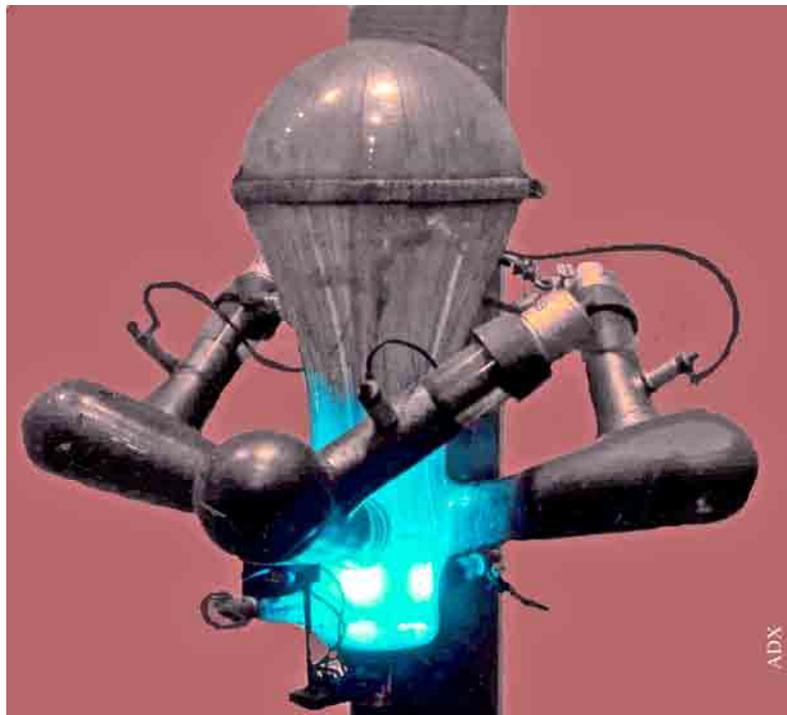
En particulier : [knol.google.com/k/le-transformateur-de-tesla#](http://knol.google.com/k/le-transformateur-de-tesla#)

**19 – L'éclairage à très haute tension** par effet capacitif a reçu une application : signaler la nuit les lignes à très haute tension aux avions. Ces lampes à décharge rouges sont suspendues le long d'un seul fil et s'éclairent grâce à la capacité entre le fil et la terre.

**20 - Les brevets de Tesla** sont moins nombreux que ceux d'Edison, 112 brevets US et au total près de 275 dans l'ensemble des pays.

- [en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_Tesla\\_patents](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Tesla_patents)

- [magnetosynergie.com](http://magnetosynergie.com) > les précurseurs > nikola tesla    [nikolatesla.fr/documents](http://nikolatesla.fr/documents)



Redresseur à vapeur de mercure Siemens 1925

Musée de Munich





*“...la réduction en esclavage de la plus puissante source d'énergie mise à la disposition de l'espèce humaine par la Nature”,*

La Cataract Company construit la première centrale du Niagara en 1895

## 4 - Centrales et réseaux de transport

Après Francfort, consécration définitive du courant alternatif, l'électricité vecteur d'énergie entrait dans l'âge adulte que nous connaissons aujourd'hui, après quelques nouvelles inventions, d'incessants perfectionnements et développements quantitatifs.

Il était prévisible que les premières applications du transport de l'énergie électrique à distance vers des centres de consommation éloignés, concernent l'énergie des chutes d'eau, l'hydroélectricité.

Ce nouvel âge se devait de débiter par la construction d'une première grande centrale hydroélectrique, la plus puissante du monde pendant des décennies.

### La puissante centrale du Niagara (1)

Depuis l'apparition des générateurs électromécaniques, les électriciens rêvaient de capter cette extraordinaire source d'énergie, seulement 50 000 ch pour commencer, une faible partie des trois millions de chevaux de la célèbre chute du Niagara, sur la frontière des États-Unis et du Canada. Aucun aménagement électrique n'a jamais autant enfiévré l'imagination, ni autant mobilisé électriciens et hydrauliciens pour trouver les solutions d'une entreprise totalement nouvelle. Les banquiers aussi se sont penchés avec forte attention sur l'avenir de l'électricité.

Après une première scierie en 1725, l'aménagement du Niagara avait commencé en 1861, avec la construction par Horace Day d'un canal de 1400 m, dérivant l'eau de la rivière en amont des chutes pour remplir un petit lac. Sur ses bords, une dizaine d'usines turbaient l'eau pour diverses utilisations de force mécanique en la renvoyant ensuite en aval. La puissance installée atteignait 10 000 ch, constituant le site le plus puissant du monde, dès avant l'hydroélectricité (a1)

En 1886, Thomas Evershed esquisse un projet de 200 000 ch. Finalement en 1889, la *Cataract Construction Company* et la *Niagara Falls Power Co* fusionnent dans la société *Cataract*, sous les auspices attentifs des grands banquiers Morgan, Vanderbilt, Rothschild. La direction est assurée par l'électricien E.D. Adams et l'ingénieur mécanicien Coleman Sellers.

Le site faisait partie d'un parc national créé par la reine Victoria en 1885, il était donc impératif que son aménagement ne le dégrade pas. Le débit de la rivière Niagara, 3000 à 5000 m<sup>3</sup>/s, suivant la saison, serait à peine affecté



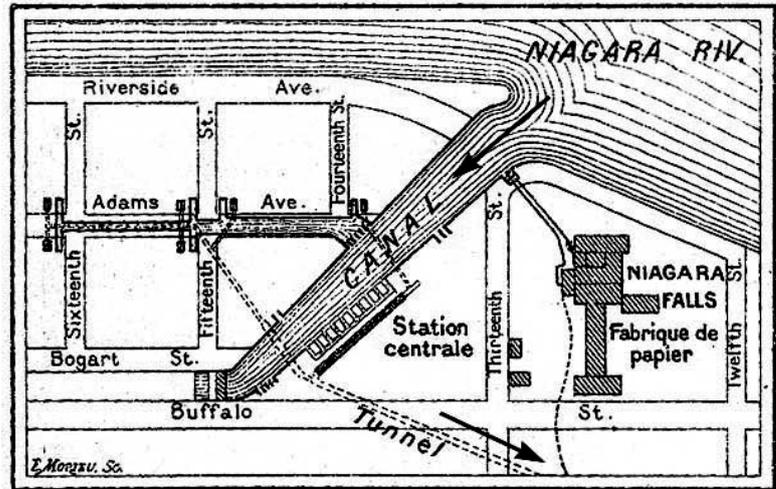
a1

Usines hydrauliques de Niagara avant 1890

par la dérivation vers les turbines de l'eau nécessaire pour obtenir une puissance future de 120 000 ch, n'empruntant que 150 m<sup>3</sup>/s, avec une hauteur utile de chute d'environ 55 m.

La chute du Niagara est constituée de deux chutes séparées par *Goat Island*. Côté rive droite, c'est la chute américaine de 300 m de large, où coule seulement 10% du débit ; le reste s'écoule par la chute canadienne, large de 840 m, le *Horse Shoe*.

L'eau de la rivière serait dérivée en amont de la chute de 61 m vers un canal alimentant les prises d'eau de la centrale sur la rive droite américaine, au milieu d'une ville nouvelle Niagara Falls City à construire (a2)

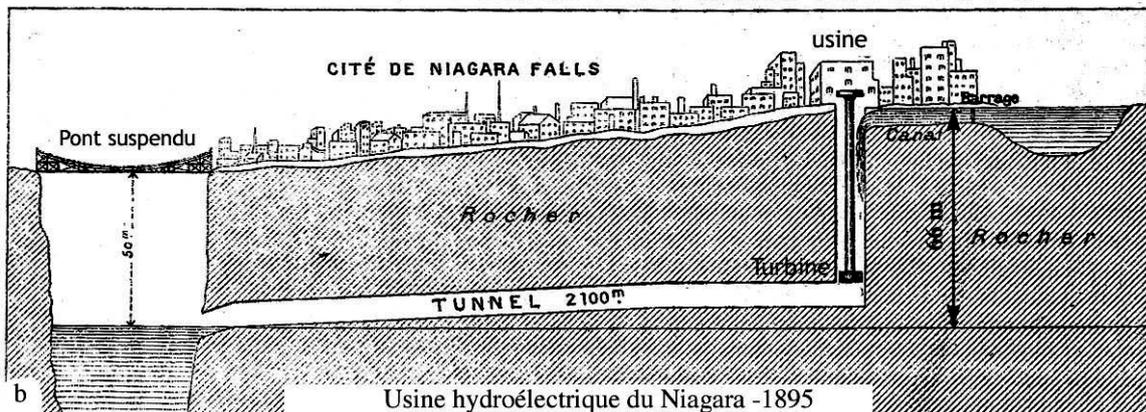


a2

Centrale du Niagara

### Élaboration du projet

Chacune des 10 machines de la centrale devait être placée au-dessus d'un puits creusé dans le roc, où descendait une conduite forcée de 7,5 feet de diamètre écoulant l'eau sous pression à la turbine installée en bas. À sa sortie, l'eau s'écoulait par un long tunnel de 2 km, prévu pour 120 000 ch, pour rejoindre la rivière Niagara en aval de la grande chute.(b)



b

Usine hydroélectrique du Niagara -1895

L'objectif énergétique était essentiellement d'alimenter aux environs, à 5 km, un grand centre industriel à créer pour diverses industries, papeterie, électrochimie, en réservant une petite puissance à transporter sur 18 miles jusqu'à la ville de Buffalo.

Adams commence en 1890 par une tournée de plusieurs mois en Europe pour visiter les grands industriels et les spécialistes, ainsi que les sites hydrauliques équipés. En France, le plus puissant depuis 1872, était celui de Bellegarde sur Rhône, 3000 ch avec possibilités de 10 000 ch, de même celui de Rioupéroux, près de Grenoble, avec 2500 ch depuis 1869. En Suisse 3000 ch à Vallorbe en 1890 équipé par la Société d'Électrochimie.

Il se rendit compte qu'il aurait intérêt à profiter de l'expérience des constructeurs européens et créa l'*International Niagara Commission* dirigée par Sir William Thomson (futur Lord Kelvin) avec N.Mascart, professeur français, Th.Turettini, ingénieur de la ville de Genève, C. Unwin, professeur anglais et C.Sellers, américain. Elle était chargée d'inviter toutes les entreprises étrangères à proposer et définir les principes et techniques à adopter pour cet équipement hydroélectrique entièrement nouveau, en particulier par sa puissance.

Il était cependant prévu que tous les matériels seraient fabriqués aux États-Unis, éventuellement en versant des droits aux sociétés étrangères qui participeraient à la conception.

Dans les premières 28 invitations à proposition de 1890, il était seulement précisé que le procédé de *transmission* devait être plutôt électrique et le courant adopté de préférence continu. Dans les réponses, pour la partie transport et distribution figurait 7 systèmes électriques, 2 en polyphasé, 5 en courant continu, 4 à air comprimé et 2 à eau sous pression.

Pour la partie hydraulique, deux sociétés suisses *Escher et Wyss* de Zürich et *Faesch et Piccard* de Genève proposèrent une turbine classique type Fourneyron. Cependant les conditions locales et la puissance très élevée imposèrent une technique nouvelle, la liaison directe axiale, sans courroie, de la turbine à l'alternateur placé au-dessus, au moyen d'un arbre vertical. Cela posait un difficile problème mécanique de suspendre sur un palier tout le poids de la partie tournante, les rotors de la turbine en bas et de l'alternateur en haut, plus l'arbre de transmission qui les reliait. Le palier serait lubrifié par de l'huile sous pression et par précaution refroidi à l'eau.

Pour la partie la plus importante, la production et la distribution électrique, aucune des grandes firmes, Oerlikon, AEG, Edison, Westinghouse n'avaient l'intention de fournir de l'information gratuite en détaillant leurs solutions techniques nouvelles, tant que l'on ne traiterait pas la question sous l'angle *business*.

En 1891, le problème n'avait guère avancé, si ce n'est que l'on ferait deux centrales de 50 000 ch (36 MW). La nouvelle de l'expérience de Francfort rapportée par la délégation de l'AIEE impressionna, et Brown d'Oerlikon fut invité à Niagara. Il ne vint pas, pressentant que sa participation se limiterait uniquement à donner son savoir faire sans obtenir un marché, et puis il était trop occupé à fonder sa nouvelle société Brown Boveri.

Aussi en avril 1892, Adams nomma "*electrical adviser*" l'Anglais George Forbes, ingénieur et professeur, pour définir avec 6 constructeurs les caractéristiques de l'installation et des machines et ensuite faire les appels d'offres. Les négociations furent longues et difficiles. En mai, il signifia à Général Electric d'abandonner le courant continu. Oerlikon propose plusieurs variantes basées sur des machines triphasé de 5000 ch, tournant à 250 tr/min et fournissant du 50 Hz.

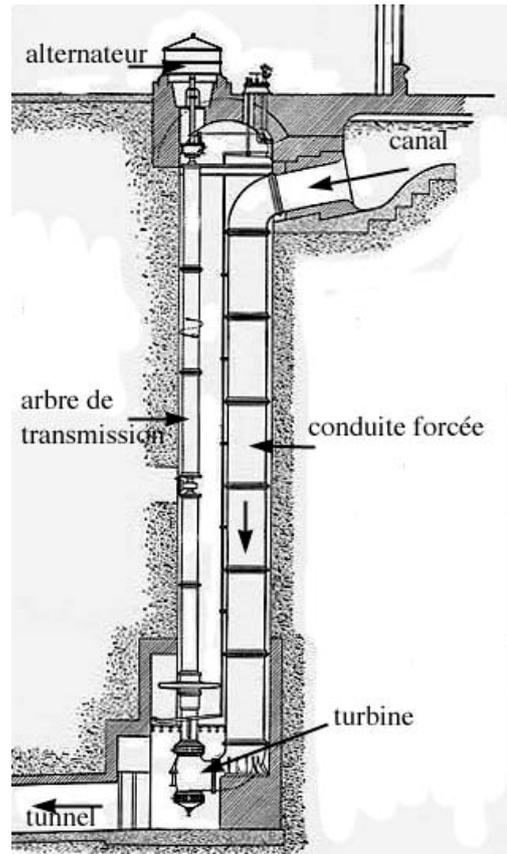
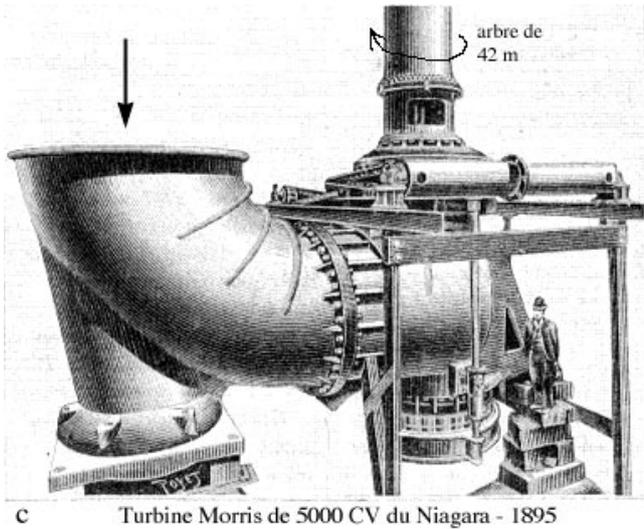
Westinghouse prévoit les mêmes puissance et vitesse, mais en biphasé et une fréquence de 33,1/3 Hz. General Electric fait une proposition semblable mais en triphasé, non breveté par les Européens en Amérique, ce qui lui permet d'échapper aux brevets Tesla qui ne couvraient que le biphasé.

C'est à cette époque qu'avait lieu la puissante présentation de Westinghouse à l'exposition de Chicago ; elle avait sans doute influencé Forbes pour son choix final du biphasé. Pour la fréquence, Westinghouse voulait une fréquence assez élevée, Forbes 16,2/3 Hz, on adopta le compromis de 25 Hz. La tension des machines était de 2200 V sans transformation, soit une intensité de 775 A par phase. Compte tenu de la vitesse optimale de 250 tr/min pour la turbine, proposée par les Suisses, l'inducteur comportait alors 6 paires de pôles.

Le contrat fut finalement signé avec Westinghouse le 26 octobre 1893 pour mise en service des 3 premiers générateurs, sur les 10 prévus, en 1895. C'était un grand succès commercial et technique que l'homme de Pittsburg préparait depuis plusieurs années. Les propositions de Brown en triphasé étaient techniquement plus intéressantes, mais l'affaire ne pouvait revenir qu'à un constructeur américain.

General Electric obtint comme lot de consolation la ligne de transport de Niagara à Buffalo, 18 miles, soit 27 km, qu'elle imposa en triphasé, ce qui lui ouvrit le marché des moteurs de Buffalo et indirectement la plaça en tête de cette technique d'avenir du triphasé, initiée sur le vieux continent.

Forbes fut remplacé en tant que *electrical adviser* par Lewis B. Stillwell, ingénieur en chef de Westinghouse. Celui-ci répartit les responsabilités sur ses ingénieurs les plus compétents, car la réputation de la compagnie était en jeu.



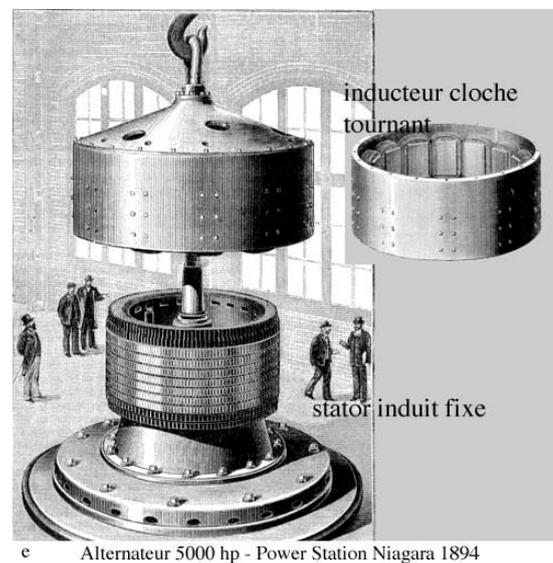
### Les groupes turbine-alternateur

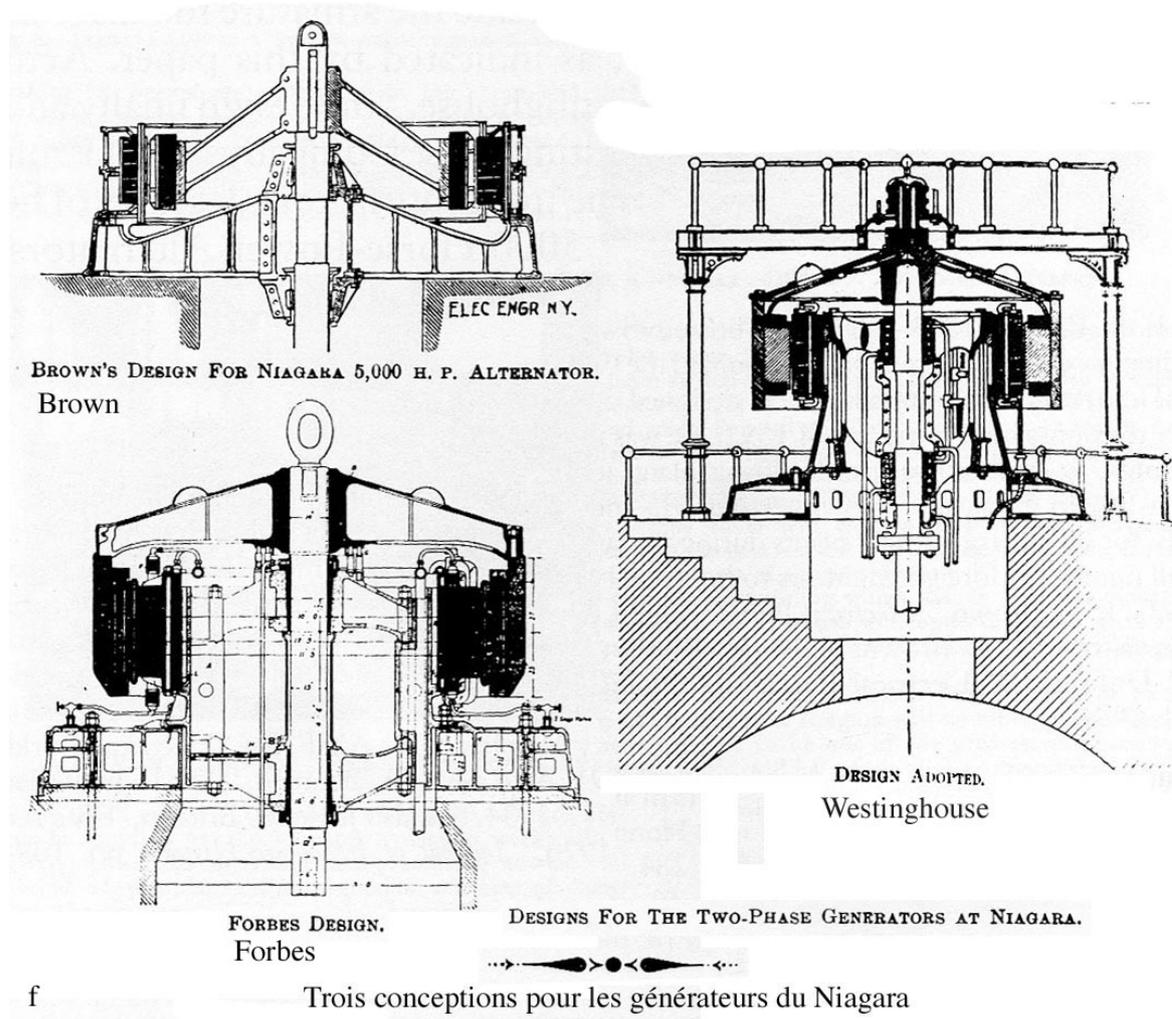
Aucune autre installation de cette puissance n'avait jamais été réalisée, une grande première.

Les turbines furent fabriquées par Morris Co de Philadelphie suivant les plans fournis par Faesch et Picard de Genève (c) Elles étaient installées au fond du puits de 50 m (d) et couplées à l'alternateur au niveau du sol par un arbre creux vertical de 42 m. Cette disposition innovante, due à Brown, de l'alternateur au-dessus de la turbine reliée par un arbre vertical, est devenue classique, mais la très grande longueur de l'arbre, 42 m, a dû poser de sérieux problèmes d'alignement. Après le montage des trois premiers groupes en 1895, la Cataract Co envisagea pour les autres, de placer l'alternateur juste au-dessus de la turbine au fond du puits ; d'autres difficultés apparaissaient alors et le système fut conservé, mais jamais reproduit pour d'autres centrales. Pour l'alternateur à axe vertical (e) l'induit statorique était fixe, mais assez étrangement même à l'époque, l'inducteur rotorique ne tournait pas à l'intérieur du stator mais à l'extérieur, le recouvrant comme une cloche, il pesait seul 31 t, pour un poids total de 77 t.

Cette conception fit l'objet d'une controverse lors de la présentation du projet par Forbes à Londres devant l'IEE. L'anglais Ferranti y représentait le suisse Brown absent. Il reprocha d'abord à la Cataract Co de solliciter les conceptions des constructeurs européens en réservant la fabrication aux constructeurs américains ; par ailleurs, il critiquait les solutions adoptées par Westinghouse, d'une fréquence de 25 Hz trop faible et surtout de l'inducteur en cloche tournant à l'extérieur. Cette disposition était mauvaise pour le refroidissement de l'induit et son accessibilité (f).

L'avenir lui donna raison. Dans aucune autre centrale, même à Niagara, 10 ans plus tard, cette solution d'inducteur extérieur en cloche ne fut reprise. La fréquence qui se généralisa progressivement en Europe fut 50 Hz et 60 Hz en Amérique. L'une ou l'autre ailleurs.





Les 3 premiers groupes furent terminés comme prévu en 1895, les lignes biphasées 2200 V à 4 conducteurs devaient alimenter dans les environs une dizaine de gros clients, les premières usines exploitant cette nouvelle application de l'électricité, l'électrochimie, qui nécessitait de très fortes puissances pour leurs cuves d'électrolyse et fours électriques d'aluminium, carborundum, chlorate et ferroalliages.

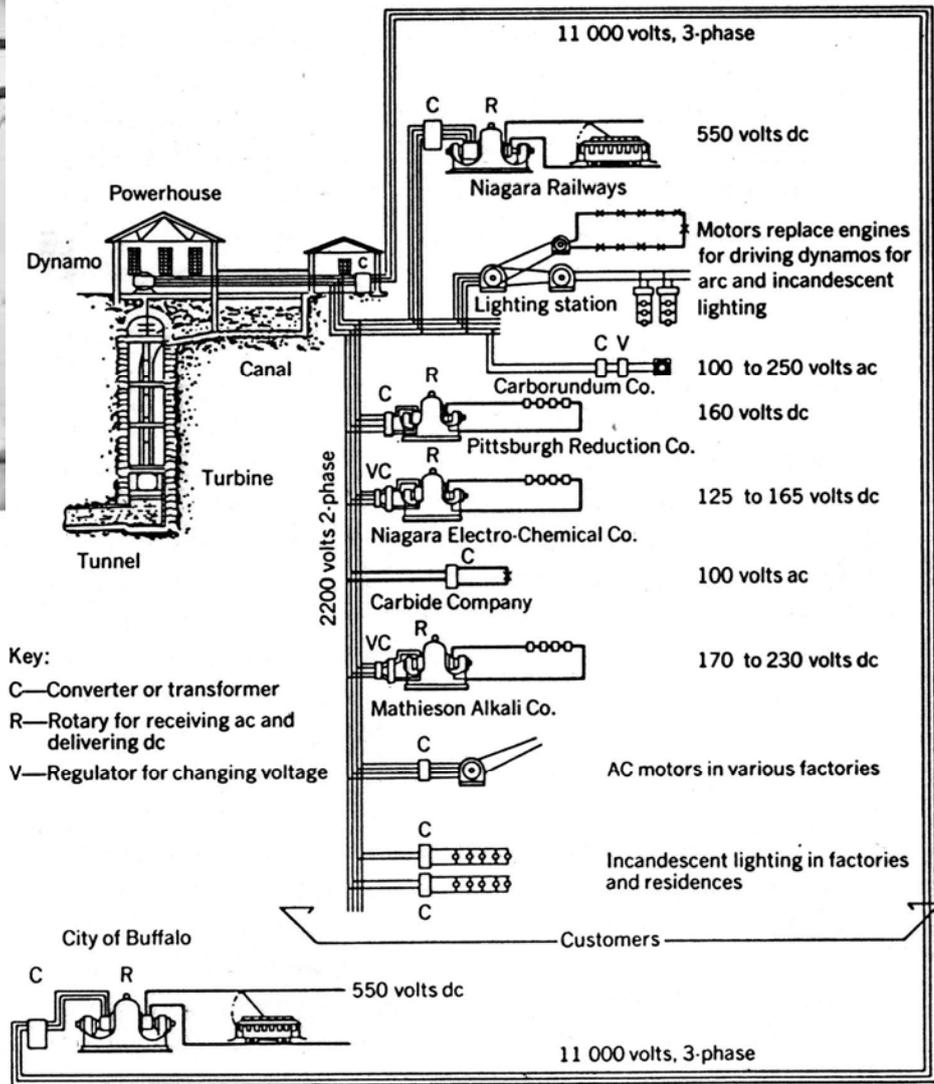
Le 26 août, jour de l'inauguration, le courant arrivait à la *Pittsburg Reduction Co*, devenue plus tard la puissante *ALCOA*, puis à diverses usines et à un tramway (g). Sur ce schéma de 1897 figure la transmission d'énergie jusqu'à Buffalo, mais le biphasé de Tesla, malheureusement adopté par Westinghouse, était plus coûteux en poids de cuivre et pertes que le triphasé suisse-allemand qui par surcroît permettait des moteurs asynchrones plus performants.

Cette ligne avait été concédée à Général Electric qui s'était orienté sur le triphasé des Européens. Comment alors obtenir du triphasé à partir des alternateurs en biphasé ? Charles E. Scott, ingénieur de Westinghouse, trouva une solution élégante en montant la tension de 2200 V biphasé au primaire à 11 000 V triphasé au secondaire, par l'invention d'un transformateur original.

La puissance de 1000 ch transmise à Buffalo s'avéra vite insuffisante, la ligne de 175 mm<sup>2</sup> fut doublée et finalement en 1901 la tension fut portée à 22 000 volts avec une capacité de 20 000 ch (g2).



g2 Ligne 22 kV triphasé Niagara-Buffalo



g Equipement hydroélectrique du Niagara - 50 000 CV - 1897

Le 12/1/1897, au cours de l'inauguration, Westinghouse fit prononcer à Tesla un discours, brillant à son habitude, pour bien montrer à l'Amérique qu'Edison, le savant de Général Electric n'était pas le seul génial inventeur. Une statue en bronze de Tesla fut érigée, bien que son apport à cette grande réalisation, où il n'était guère venu, se résumait à l'idée 10 ans plus tôt de moteurs asynchrone biphasé, installés uniquement chez les utilisateurs de Niagara – ceux de Buffalo étant alimenté par la ligne triphasé. On effaça son erreur d'avoir entraîné Westinghouse sur ce biphasé en installant la statue de Tesla sur une machine triphasé, conçue en Allemagne (h1).

Les jeunes Serbes traversent parfois l'Atlantique pour y vénérer leur illustre ancêtre. Rappelons que ces deux hommes, Edison et Tesla, hors du commun, avaient sur le plan personnel comme professionnel, de grandes qualités associées à de graves défauts. Ils se méprisaient d'ailleurs cordialement, chacun étant la figure de proue médiatique de l'un des deux grands groupes électriques concurrents aux Etats-Unis, Westinghouse et General Electric (2).



h1 Statue de Tesla à Niagara Falls

### Développement ultérieur

Après cette première installation, dénommé *Adams Power Station*, ou *Powerhouse 1*, (h2) la *Powerhouse 2* prévue à l'origine, utilisant le même canal d'amenée et le même tunnel de fuite, fut réalisé entre 1900 et 1903, la puissance fut un peu plus élevée, 11 groupes totalisant 4,1 MW ; mais cette fois avec le triphasé.

D'autres équipements suivirent sur les deux rives, canadienne et américaine, mais en implantant les centrales au pied des falaises, au point de restitution de l'eau. L'amenée d'eau aux turbines se faisait par des conduites souterraines depuis la prise d'eau, en amont des chutes.

Aujourd'hui, le Niagara est équipé au maximum, avec une puissance de 4000 MW, soit l'équivalent de quatre centrales thermiques, mais pas en permanence, seulement les mois hors saison touristique, où le débit libre des chutes est maintenu à 1400 m<sup>3</sup>/s pour le spectacle.



h2 Centrale du Niagara - 10 groupes de 5000 HP - 1896

Il reste célèbre chez les électriciens pour deux accidents graves.

- En 1956, l'effondrement de la falaise sur l'une des grandes centrales installées ultérieurement à son pied, tuant 40 personnes sous les ruines.

- Le 9 novembre 1965, l'énergie produite par le Niagara fut impliquée dans une panne, la plus grande de l'histoire jusque-là, un **black-out**. (3) Une ligne à très haute tension, transmettant sa puissance maximum vers le Nord Est des USA, déclencha suite à la défaillance d'un relais de protection de la centrale Sir Adam Beck 2. Les autres lignes 345 kV brusquement surchargées, déclenchèrent en cascade en quelques secondes par leurs automatismes de protection. Une puissance de 1800 MW alimentant le réseau Nord américain s'effaça brusquement. Des centrales de New York subirent des dégâts matériels très importants. Le premier groupe thermique de 1000 MVA fut endommagé par absence de graissage. Une population de 50 millions d'habitants de 8 États, dont tout New York, fut totalement privée d'électricité pendant 3 à 13 heures. Il y avait très peu de groupes électrogène de secours, même pour les hôpitaux. Il faut imaginer les buildings sans ascenseurs, sans eau, sans climatisation, les métros, trains, aéroports stoppés, pas de téléphone, les rues et le ciel noir.

Une autre conséquence aurait été, dit-on, la surcharge imprévue des cliniques d'accouchement, 9 mois après.

L'équipement du Niagara fut un succès à l'échelle mondiale et ouvrait la voie à d'autres grands équipements. L'asservissement des forces naturelles de l'hydraulique n'était plus un rêve.

Les Européens, germano-suisses, n'avaient pas de Niagara ; ils construisirent cependant dès 1896 sur le Rhin, leur plus puissante centrale hydraulique d'Europe, pour deux décennies, à Rheinfelden à côté de Bâle. Mise en service en 1898, ses 20 groupes totalisaient 26 MW, moins que celle du Niagara. (j) Après un siècle, une partie de l'équipement d'origine tournait encore. Il sera remplacé par une nouvelle centrale en 2010 avec 4 groupes bulbes totalisant 100 MW.



1898



1995

j Centrale de Rheinfelden

Le projet de l'expérience de Lauffen-Francfort prévoyait que l'installation de la génératrice à Lauffen serait conservée et son énergie transportée définitivement jusqu'à la ville de **Heilbronn** à 12 km.

Ce premier équipement en triphasé par AEG fut opérationnel au début de 1892. La puissance de 200 kW de la génératrice sous 50 V fut transformée à 5000 volts et transportée par une ligne aérienne jusqu'à l'entrée de la ville, puis abaissée à 1500 V et distribuée par des câbles à 3 conducteurs isolés au caoutchouc, d'une nouvelle conception étudiée par Siemens, jusqu'aux transformateurs 1500/100 V proches des abonnés. Les pertes prévues pour la ligne étaient de 10% et celles de distribution aussi de 10%. Les 160 kW utiles alimentaient un total de 1500 lampes de 16 bougies, 20 lampes à arc de 10 A et 22 kW pour les moteurs de 300 W à 4 kW.

Compte tenu d'une puissance disponible de 900 ch sur le Neckar à Lauffen, l'installation fut ensuite doublée puis triplée suivant les besoins.

Une autre centrale en alternatif triphasé fut rapidement conçue à **Erding** en Autriche, dès 1893, par Siemens qui était resté un peu à l'écart pour le développement du «*drehstrom*» par ses nouveaux concurrents AEG et BBC, et cherchait à rattraper ce retard en mettant au point quelques innovations pour adapter les centrales à ce nouveau type de courant.

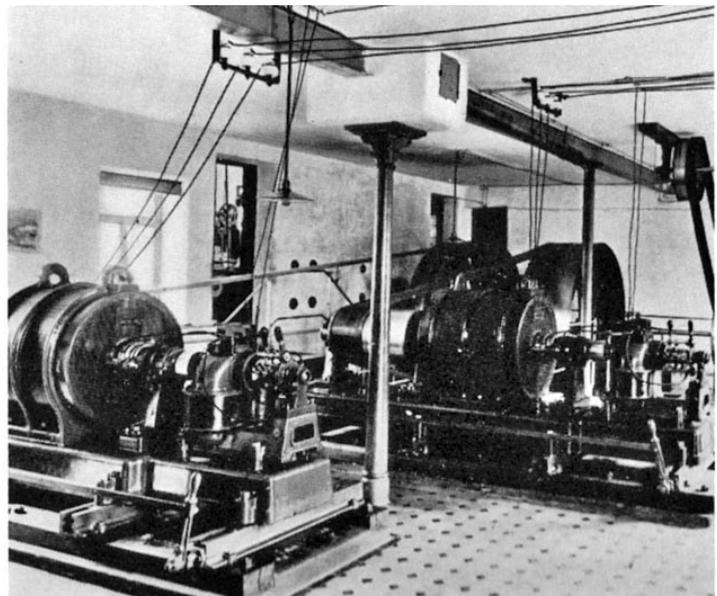
Au XXe siècle les grands équipements hydrauliques se sont multipliés accumulant des records de puissance. Ce furent en URSS celui du Dniepr en 1932, puis de la Volga en 1937- après WW2, la baie James au grand Nord canadien qui nécessita, pour transporter l'énergie à 1500 km, la première ligne THT à 735 kV – en 1978, l'équipement d'Itaipu au Brésil et Paraguay avec 20 groupes de 740 MVA totalisant 14 000 MVA.

La plus importante installation du monde est maintenant celle des Trois Gorges en Chine, 26 groupes totalisant 18 000 MVA, soit l'équivalent d'une douzaine de groupes thermiques classiques ou nucléaires.

### Centrales et réseaux en alternatif polyphasé, après 1891

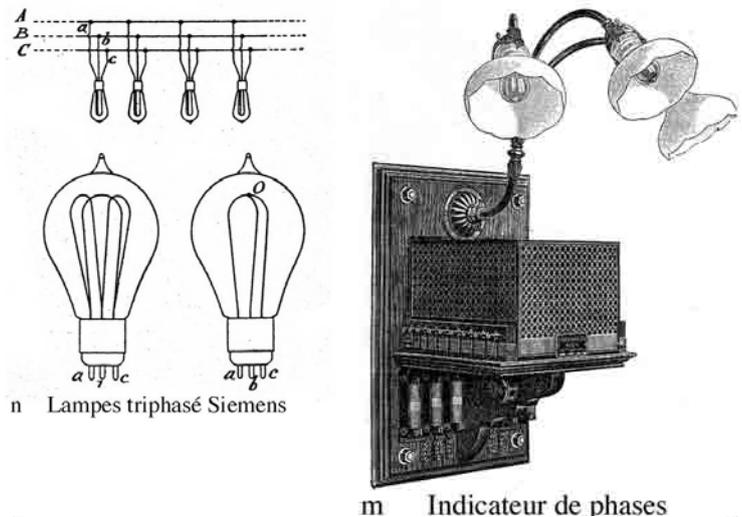
L'équipement du Niagara, point d'orgue exceptionnel, n'était cependant que l'un des équipements des nouveaux réseaux en alternatif qui allaient propager l'électricité à travers le monde.

Le projet de l'expérience de Lauffen-



k Centrale en triphasé à Erding - Siemens -1892

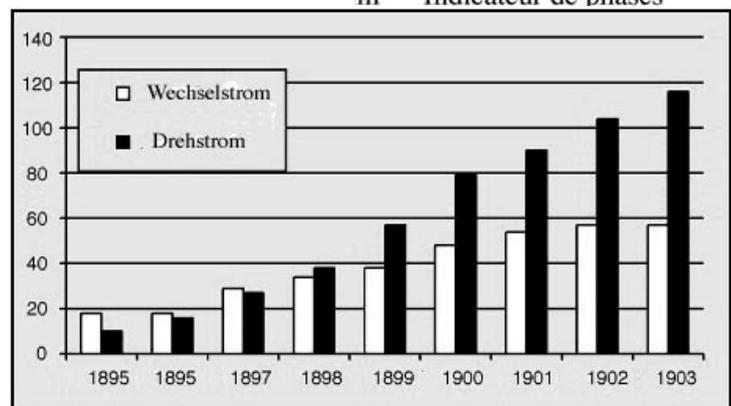
Ainsi les turbines d'un cours d'eau entraînaient deux alternateurs de 40 kW sous 3000 volts dont l'excitatrice était placée « en bout d'arbre ». (k) Un interrupteur avec fusibles commandait chacun des circuits, mis en parallèle avec un contrôleur de phase à trois lampes, devenu classique (m). La ligne aérienne à trois fils de 5 km arrivait à Erding sur 5 transformateurs abaisseurs. Chez les abonnés certains pouvaient même avoir des lampes spéciales triphasées construites par Siemens. (n).



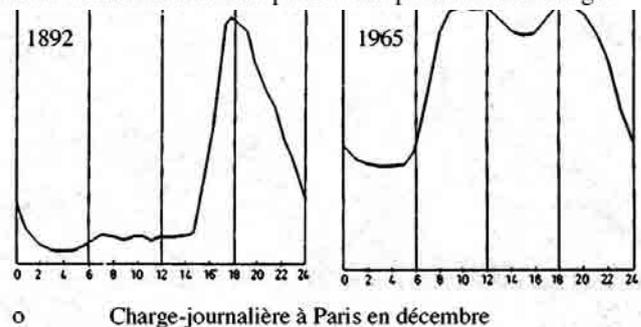
### Croissance de l'alternatif

En 1893 on dénombrait 10 installations en polyphasé : 3 en France, 4 en Allemagne, 2 en Autriche, une seule en Amérique par General Electric à Redlands en Californie.

Le développement du triphasé pour les distributions d'éclairage ne fut certes pas très rapide pendant une dizaine d'années. Il ne s'appliquait qu'aux distributions où la centrale, généralement hydraulique, était à plusieurs km de la ville. Dans les autres cas, le courant continu était souvent préféré en raison de la courbe de charge des distributions alimentant peu de force motrice, mais à 80 ou 90% d'éclairage. La puissance appelée pendant plus de 12 h était très faible, près de 8 fois moins qu'en pointe. Pour n'avoir qu'une puissance réduite, la génératrice en courant continu chargeait des accumulateurs en parallèle pendant la moitié de la journée, lesquels débitaient sur le réseau pendant les quelques heures de pointe (o).



p Nombre de centrales monophasé et triphasé en Allemagne



o Charge-journalière à Paris en décembre

En Allemagne, entre 1895 et 1903, le nombre d'installation en triphasé s'accroissait de 10 à 115 (p), alors que celui des centrales en courant continu passait de 80 à 740. L'alternatif était pénalisé par l'impossibilité de l'accumuler dans des accus pendant les creux pour couvrir les pointes.

La situation évolua après 1905, car la puissance installée dans les pays industriels augmentait à un taux annuel d'environ 7%, correspondant au doublement en 10 ans. La puissance consommée dans les villes augmentait, rendant très onéreuses des batteries d'accumulateurs dans les centrales et la courbe de charge journalière aujourd'hui n'est plus que dans le rapport 1 à 2 au plus.

La proportion de centrales et réseaux en alternatif, 10% en 1890, atteignait 50 % en 1900 et 95% en 1917, en Europe comme en Amérique.

### Vers les très hautes tensions

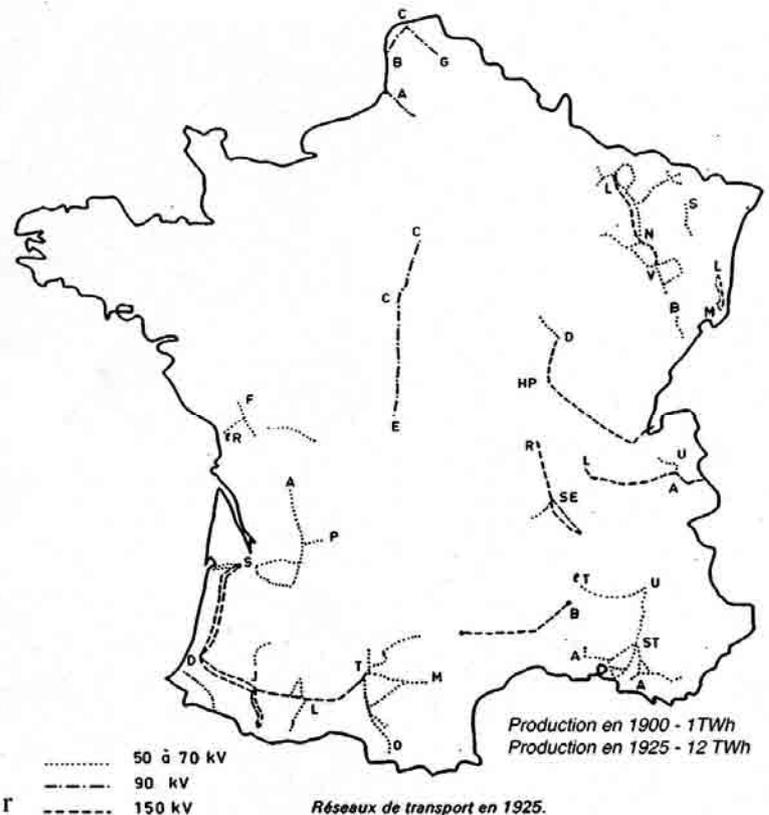
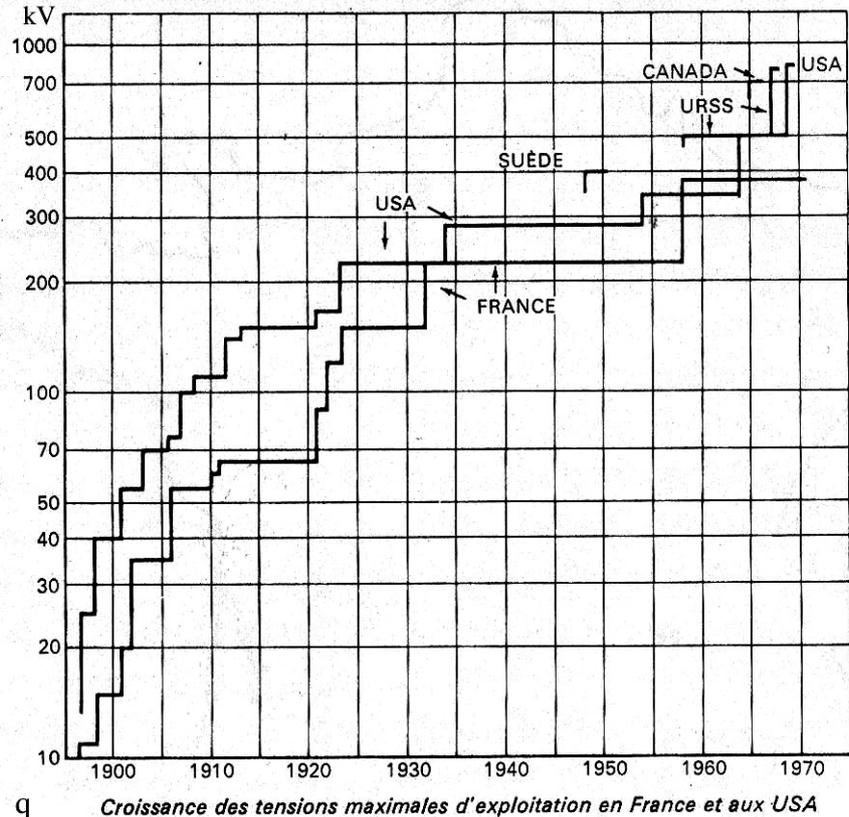
Les importantes ressources d'énergie hydraulique, de même que l'énergie thermique à partir du charbon, souvent près des mines, était éloignées des centres de consommation de centaines de km. Cela nécessitait de monter en tension (q).

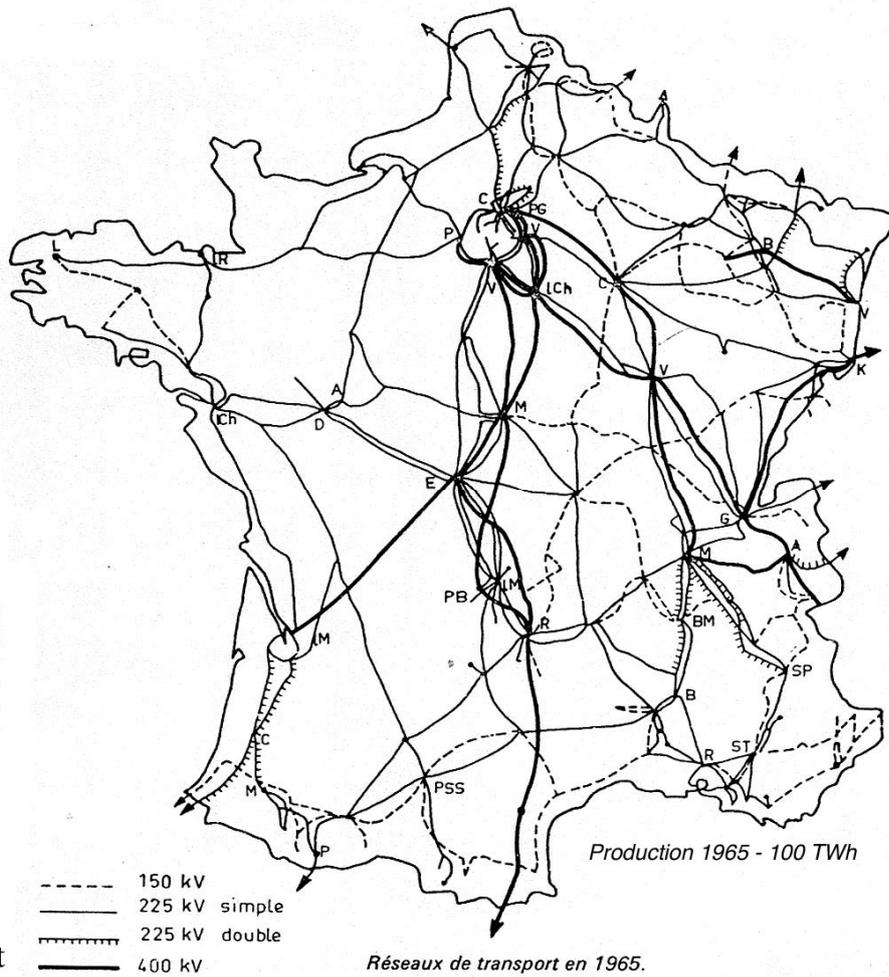
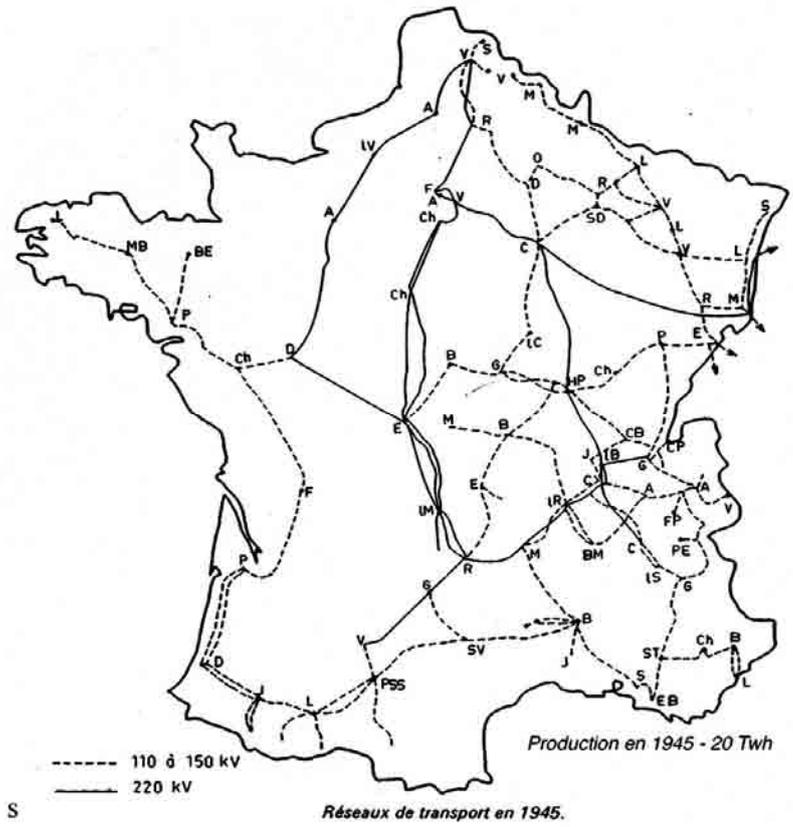
Simultanément on découvrit les avantages de l'interconnexion des petits réseaux entre eux, à la fois pour des raisons de sécurité, incident dans une centrale, et pour des motifs économiques, coût et disponibilité des différentes sources d'énergie thermiques ou hydrauliques.

Les premières interconnexions régionales apparaissent sur la carte des réseaux de transport français de 1925 (r), qui fonctionnait à 150 kV. Vingt ans après, en 1945, les lignes à 220 kV atteignaient plusieurs centaines de km, assurant une véritable interconnexion nationale (s). Vingt ans plus tard, en 1965, le maillage s'est encore densifié avec la tension de 380/400 kV, (t) échelon apparu en 1958 en France que l'on pensait devoir être dépassé à la fin du siècle. Ce niveau de tension a permis d'envisager d'étendre l'interconnexion progressive d'une partie de l'Europe, d'abord en 1965, France, Suisse et Allemagne. Il est peu probable qu'un niveau de tension supérieur s'impose en Europe.

Des tensions plus élevées sont apparues, mais pour réaliser des transports à très longue distance, le 525 kV en 1960 en URSS pour un transport à 2000 km, puis le 765 kV au Canada, en Russie aux Etats-Unis. La tension de 1200 kV a été adoptée en 1982 par la

Russie, suivie de la Chine avec 1000 kV, soit 1400 kV crête. C'est probablement un plafond qui ne sera pas dépassé en courant alternatif, car il apparaît que le transport à très haute tension continu présente des avantages, malgré le coût élevé des stations d'extrémité (ci-après).





t

### Transport en courant continu à haute tension – Le système Thury (4)

Alors que le courant alternatif venait de démontrer en 1891 à Francfort sa capacité à transporter l'énergie électrique au loin à des tensions élevées, un pionnier suisse, René Thury, propose et réalise un système original de transport en courant continu à haute tension. Il démontrait que le courant continu n'était pas abandonné, même pour le transport à haute tension, mais dans certains cas particuliers.

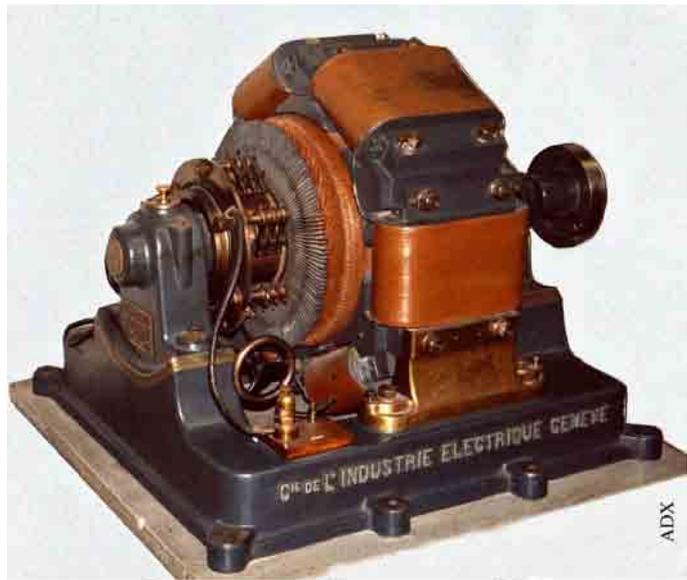
La dernière expérience de Deprez avait illustré l'incapacité du transport de force à partir d'une seule génératrice courant continu, au-delà de 3000 volts. Ensuite Fontaine démontrait en 1886 qu'avec plusieurs généra-trices en série, on pouvait sans problème faire tourner un groupe à haute tension de moteurs couplés aussi en série, à des dizaines de km.

Cette même année, Brown appliquait ce principe en Suisse dans une modeste installation transportant 30 ch à 8 km sous une tension de 2000 V, de Kriegsteten à Soleure, avec deux machines en série.

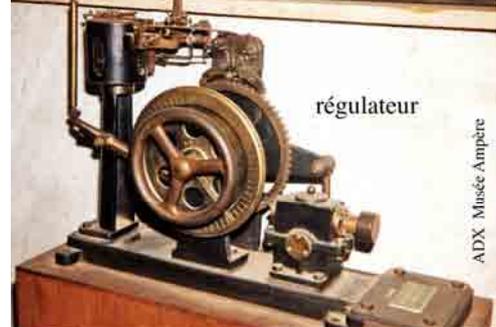
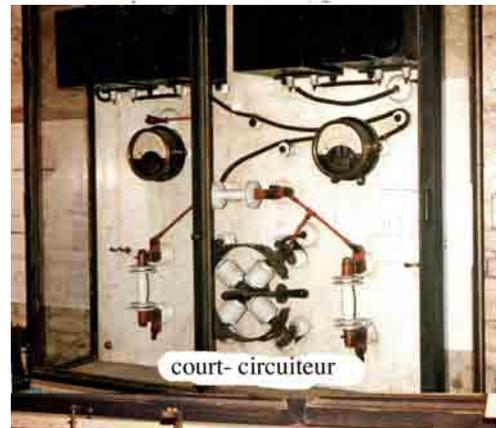
Le constructeur suisse, Cuénod, Sautter & Cie avait embauché un jeune ingénieur, René Thury, formé par l'apprentissage chez plusieurs constructeurs. Il avait conçu en 1883, à partir de l'induit à tambour Siemens, un type de dynamo à trois paires de pôles d'une conception efficace (u). Intuitivement il avait placé les bobines inductrices, le plus près possible de l'entrefer, l'inverse de la conception des premières machines Edison.

Malgré les débuts prometteurs du courant alternatif, Thury pensait que le continu avait des atouts pour le transport de force avec la mise en série de plusieurs machines, mais en les faisant fonctionner à courant constant et tension variable, suivant la charge. Il découvrit qu'avec ce couplage, la régulation était simple et inventa à cet effet en deux étapes un régulateur, *le thury*, utilisé pendant 50 ans. Le premier modèle shuntait progressivement les inducteurs ou agissait sur le décalage des balais, le second faisait varier la vitesse et agissait sur le champ inducteur (v)

Une première installation est réalisée en 1889, en Italie, pour amener la Force depuis Isoverde, jusqu'à Gênes à 26 Km. Il y a là trois chutes d'eau proches, la plus importante, la station Volta est équipée avec 5 groupes comprenant une turbine et deux génératrices de 50 kW. Les deux autres avec deux groupes de deux génératrices. Les 18 machines débitent un courant constant de 45 A sous une tension variable, au plus 800 V chacune, toutes connectées en série avec les moteurs de 20 à 60 kW installés à Gênes. La tension entre les deux conducteurs de ligne atteint 14 000 V à la pleine charge de 900 kW. La régulation est assurée par le système agissant sur le calage des balais. Le rendement global, machines et ligne est de 72 %.



u

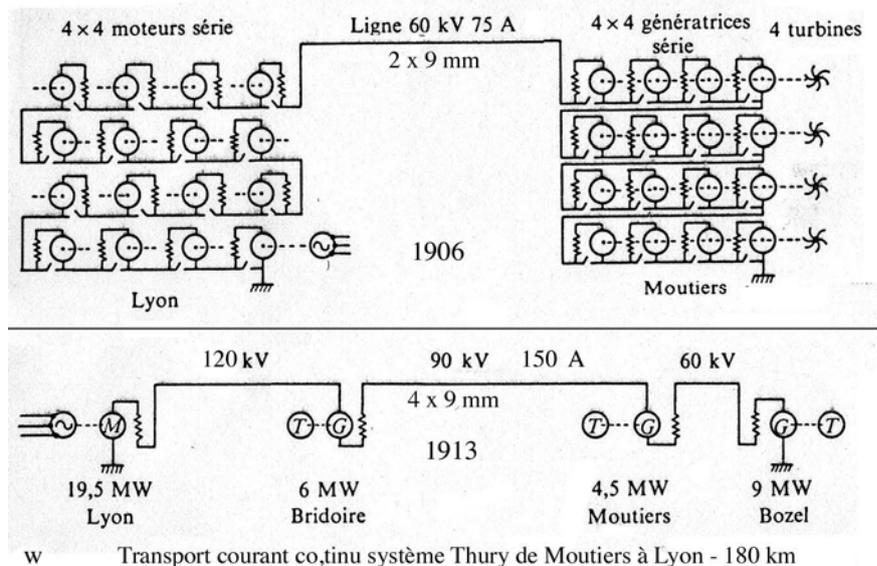


v Transport Thury Moutiers-Lyon  
Appareillages

Cette première expérience était concluante. À l'usage, le système s'avérait pratique en service, le régulateur étant automatique et l'appareillage se résumait à un court-circuiteur, si l'on voulait arrêter une machine sans les arcs des interrupteurs classiques. Les machines étant à haute tension étaient installées sur un socle isolant. Des parafoudres spéciaux protégeaient les machines à l'entrée de la ligne haute tension. Celle-ci était suspendue à des isolateurs ordinaires en porcelaine, prévus pour la moitié de la tension entre les deux fils, car un point milieu était mis à la terre.

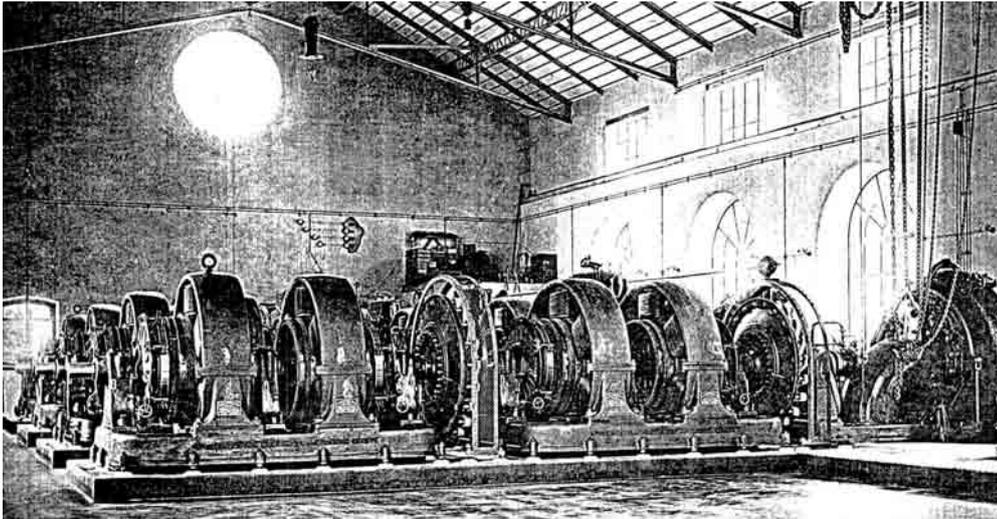
Thury fit même l'essai sur une installation pendant un an de supprimer l'un des deux fils, en utilisant la terre comme deuxième conducteur. C'était possible, mais l'on craignait des corrosions des câbles et tuyauteries souterraines, et puis le potentiel entre le conducteur sous câble et la terre était alors doublé. On pouvait certes reprocher au système série en continu d'avoir des pertes en ligne constantes, quelle que soit la charge. Il était toujours possible de les réduire en augmentant la section des conducteurs pour un coût d'investissement faible, compte tenu d'un coût total qui s'avérait compétitif avec un équipement analogue en triphasé. Par contre, il n'était pas envisageable de constituer un réseau de distribution avec de multiples dérivations. Néanmoins, on pouvait connecter en série sur le parcours de la ligne plusieurs stations génératrices éloignées, de même plusieurs stations d'arrivée de l'énergie.

En coût d'investissement et d'exploitation ce transport C.C. était concurrentiel avec un transport C.A. Aussi en 12 ans, plusieurs transports Thury seront réalisés d'après ce principe, 5 installations en Suisse, 4 en Italie, 2 en France, 2 en Espagne, 2 en Russie et 2 en Hongrie. Il correspondait bien aux besoins de l'époque, transporter de l'énergie hydroélectrique d'une centrale où elle était difficilement utilisable à des dizaines de Km jusqu'à plus de 100 Km, vers un centre de consommation. Les puissances s'échelonnaient de 250 à 5000 ch. L'intensité constante, choisie pour le besoin d'un seul récepteur était de 50 à 250 A et la tension maxi de 2000 à 22 000 V, ce qui nécessitait des machines de 2000 à 3500 V de construction normale dans le type Thury de la *Compagnie électrique de Genève*, la CIE.



En 1906 fut mis en service en France le transport Thury le plus important, mais le dernier semble-t-il. La *SGFL, Société Grenobloise de Force et Lumière*, société de transport et distribution, confia à la CIE la réalisation d'un transport sur 180 Km par une ligne aérienne à deux conducteurs, depuis ses centrales turbinant l'eau de l'Isère à Moutiers, jusqu'à l'entrée de Lyon, à Vaux en Velin (w). De là la ligne était prolongée sur 7 Km par un câble jusqu'au poste de la rue d'Alsace, pour alimenter les tramways lyonnais. Ce premier câble isolé au papier, réalisé pour une tension continue aussi haute, 60 kV entre fils et à la terre, n'a pas eu de défauts en 30 ans (x).

En premier stade, il y avait à Moutiers 4 groupes de 4 génératrices débitant 75 A chacune sous 3,7 kV maxi, à Lyon le même équipement en moteurs entraînant chacun, soit un alternateur triphasé alimentant les réseaux locaux, soit une dynamo 600 V pour les tramways.



y MOUTIERS - Salle des machines - Transport courant continu haute tension vers Lyon



x Câble 60 kV Thury - Lyon

La puissance totale était de 4500 kW à 57 000 V

En 1911, la nouvelle centrale de Bozel était raccordée, portant la puissance à 13,5 MW, avec un courant de 150 A et une tension maxi de 90 kV. Puis la centrale de La Bridoire accroît la puissance à près de 20 MW et la tension à plus de 100 kV.

En 1917 La Bridoire est remplacée par la centrale de Fond de France sur le Bréda.

Cette installation spectaculaire fonctionnera bien jusqu'en 1936, où elle fut démantelée car elle ne pouvait s'intégrer dans le grand réseau triphasé interconnecté en développement.

Thury ne pouvait imaginer qu'aujourd'hui ce transport en continu haute tension se développerait à nouveau, sans machines tournantes, mais avec la technologie des semi-conducteurs, après la technologie transitoire des redresseurs à vapeur de mercure.

## Transport en courant continu haute tension - CCHT (HVDC) (5)

*Avec les redresseurs au mercure*

On constata en effet que ces redresseurs à vapeur de mercure (IV-3) équipés d'une grille de contrôle étaient des machines réversibles, capables de transformer aussi le courant continu en courant alternatif, ce qu'on appelle aujourd'hui un onduleur. D'où la possibilité de convertir l'alternatif en continu pour un transport spécifique, puis de le reconvertir en alternatif à l'autre extrémité.

Cependant, il était difficile de concevoir des redresseurs capables de dépasser quelques kV de tension. Un ingénieur de ASEA trouva en 1929 la solution, en disposant entre l'anode et la cathode des électrodes de répartition de potentiel.

Des installations expérimentales appliquèrent ce principe : aux USA en 1936 par Général Electric, 5,2 MW sous 30 kV pour une longueur de 17 km. Suivirent une installation suisse en 1939 et en Suède par ASEA à Trollhättan, 58 km sous 50 kV, ainsi que d'autres essais en Allemagne.

La guerre interrompit ces expérimentations, qui permettaient d'envisager des transports d'énergie par câbles sous-marins, problème presque insoluble avec le courant alternatif, pour la même raison que l'on avait rencontré avec les câbles télégraphiques (V-1), leur trop forte capacité, proportionnelle à leur longueur. Dans un câble triphasé les conducteurs ne sont séparés que par une assez mince couche d'isolant, bon diélectrique ; il en résulte une forte capacité linéique. De même pour leur capacité avec le milieu qui les entoure, terre, ou eau s'ils sont immergés. Il a déjà été évoqué qu'en alternatif, une énergie est alors accumulée puis renvoyée vers la source 100 ou 120 fois par seconde. De plus cette énergie,  $\frac{1}{2} C.U^2$ , étant proportionnelle au carré de la tension va entraîner un courant réactif d'autant plus élevé, qui bien que décalé d'un quart de phase avec le courant actif, va surcharger inutilement le câble.



z. Redresseurs à mercure de Gotland 1954

Un câble ne peut ainsi transporter valablement de l'énergie active sous 100 kV au-delà d'une dizaine de km. La solution est de disposer en série avec le câble d'importantes inductances à fer qui vont compenser ce courant réactif. C'est coûteux et impossible si le câble est immergé en mer.

La conversion de l'alternatif en continu à haute tension se révélait la solution pour les câbles s/marins. Dans ce cas la capacité du câble n'est chargée qu'à sa mise en service, il n'y a plus de courant capacitif permanent.

Après 4 ans d'études, la société ASEA réalisa la première liaison sous-marine en 1954, un câble transportant 20 MW sous 100 kV, long de 96 km, entre la Suède et l'île de Gotland. Le câble était unipolaire, le retour s'effectuant par la mer par des électrodes spéciales immergées aux deux extrémités. (z) La voie était tracée. L'année suivante est posée la première liaison trans-Manche entre France et Angleterre de 160 MW avec deux câbles unipolaires de 60 km à + ou - 100 kV, avec point milieu à la mer. Pour les anglais, îliens toujours soucieux d'une certaine indépendance vis-à-vis de l'Europe continen-tale, cette liaison

n'imposait pas à leur réseau d'être synchronisé avec celui des Français, comme d'en subir les éventuelles perturbations. C'est l'un des avantages important, perçu plus tard, de la transmission par courant continu.

En 1970, suivit aux U.S.A. une liaison de 1350 km, 1440 MW sous + ou - 400 kV, le point milieu étant à la terre, pour la *Pacific Intertie*, réalisée par Siemens et AEG.

#### *Avec les thyristors*

L'apparition des semi-conducteurs de puissance amorça un réel progrès, le remplacement des redresseurs au mercure par des thyristors. Compte tenu de leur mise en série pour tenir la haute tension, la commande de leur gâchette se faisait par optoélectronique. La première application en 1970 fut l'accroissement de la liaison de Gotland pour 10 MW sous 50 kV.

Une deuxième génération de thyristors équipa en 1973 la liaison Suède - Danemark, 135 kV, 1000 A pour Konti-Skan. Les progrès et nouvelles installations se succédèrent donnant à ASEA une position dominante par son expérience, mais non exclusive. Ainsi une association Siemens - AEG -ABB réalisa en 1977 la liaison terrestre de 1500 km de Cahora Bassa en Afrique du Sud, 1920 MW sous + ou - 533 kV.

L'interconnexion France - Angleterre IFA fut renforcée par un double câble 2000 MW, sous + ou - 270 kV (za).

Pour évacuer une partie de l'énergie de la centrale géante d'Itaipu, un record de puissance fut établi avec 6300 MW transportés à 800 km, sous + ou - 600 kV.



za Symbole de la liaisson France-Angleterre 2000 MW

De nouveaux records sont établis avec les réalisations chinoises des Trois Gorges. À chaque extrémité d'une liaison CCHT on trouve des postes identiques comprenant trois éléments :

- Les transformateurs adaptant la tension du réseau à celle choisie pour la liaison CC, câble s/marin ou ligne aérienne.
- Des groupes de filtres LC pour éliminer les harmoniques générés par la conversion CC/CA
- Le redresseur à thyristors fonctionnant en onduleur.

#### Applications du CCHT (5)

Elles se sont révélées au fil des années, avec les progrès accomplis à chaque nouvelle installation. À l'origine, l'objectif était de réaliser des transports d'énergie par câbles sous-marins, seuls capables de transporter des MW en haute tension.

Puis en montant en tension et puissance on découvrit que ce type de liaison CC permettait de transporter de l'énergie à grande distance terrestre, 1000 km et plus, avec d'appréciables avantages techniques et économiques sur le CA.

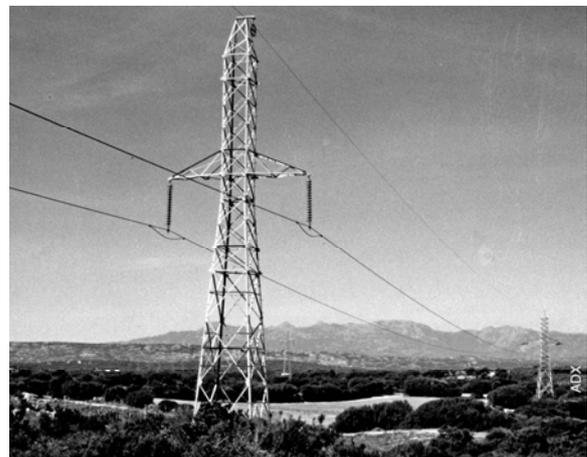
Comme souvent en technique, l'ouverture d'une nouvelle voie va en ouvrir une autre insoupçonnée. La tendance logique étant de réaliser des réseaux interconnectés de plus en plus étendus, donc puissants, cela entraînait des inconvénients pour contrôler le transit de puissance entre ces réseaux, pouvant aller jusqu'à des black-out difficiles à limiter. Aussi des installations où le redresseur et l'onduleur sont dans le même poste « dos-à-dos, ou *back to back* » se sont développées. Elles réalisent une sorte de séparation « filtrée » des deux réseaux permettant d'éviter que l'un des réseaux transmette à l'autre ses perturbations, tout en assurant un transit de l'énergie normale. Les deux réseaux ne sont pas synchrones et leurs fréquences peuvent même être différent, solution idéale dans certaines régions où l'on souhaite relier un réseau à 50 Hz avec un autre à 60 Hz, comme interconnecter le Nord et le Sud du Japon.

Il faut noter que ce transport en CCHT ne peut véhiculer l'énergie qu'entre les deux extrémités, sans aucune possibilité de soutirer de la ligne CC de l'énergie pour la distribuer le long du parcours, comme le réalise toute interconnexion maillée en CA. Il a été expliqué précédemment, que cela résulte de l'impossibilité de construire un interrupteur électromécanique en courant continu au-delà de quelques kV. Et pourtant cette opération pourrait peut-être s'effectuer par des thyristors. C'est ce qui a été tenté sur la liaison Italie-Sardaigne via la Corse, 300 MW sous 200 kV, partiellement s/marine et terrestre en Corse (zb). Ce « soutirage » d'énergie a été installé vers 2000 au poste d'atterrissage de Luciana, avec des semi-conducteurs, mais il n'a pas été possible d'en connaître le résultat, lequel n'est probablement pas positif.

Ce serait pourtant un sérieux avantage de pouvoir seulement dériver ou injecter de l'énergie tout au long d'une ligne CCHT, sans aller encore jusqu'au maillage des réseaux en alternatif.

Le transport en courant continu haute tension proposé par Fontaine, puis réalisé avec des améliorations par Thury, a traversé un siècle, en passant certes de la machine tournante au redresseur à gaz, puis à semi-conducteur.

Le CCHT d'aujourd'hui reste un cas très particulier et intéressant, confirmant la presque universalité du courant alternatif pour transporter et surtout distribuer l'énergie électrique.



zb Ligne CCHT 200 kV en Corse

## Compléments

### 1 - Bibliographie Niagara

- Plusieurs articles les revues des années 1893/96 dans La Lumière électrique, L'industrie électrique, La Nature.

- *Niagara To-Day* - The Electrical Engineer vol. XIX p. 43-44 1895.

- *The Niagara Dynamo Controversy* The Elec. Eng. vol XIX p. 308, 1895.

- BELFIELD ROBERT, *The Niagara System 1883-1896*, Proceedings of the IEEE, vol.64, N° 9, sept. 1976.

**2 – Edison et Tesla.** Margaret Cheney note que la relation entre les deux hommes était condamnée dès le départ, à cause de trop fortes différences de personnalité, d'éducation, de méthodes. Edison, esprit pratique et travailleur, n'aimait pas le côté intellectuel, théoricien et cultivé chez Tesla. Quatre-vingt dix pour cent du génie, selon le sorcier de Menlo Park, consiste à *savoir ce qui ne va pas marcher*. C'est pourquoi il abordait tous les problèmes à l'aide d'une méthode élaborée d'élimination systématique, qui s'avérait longue et coûteuse.

Tesla s'amusait de ce « dragage empirique » : *Si Edison devait chercher une aiguille dans une botte de foin, il se lancerait sur le champ, avec l'empressement d'une abeille, dans l'examen de chaque fêtu de paille l'un après l'autre, jusqu'à ce qu'il trouve l'objet cherché. J'étais le témoin attristé de telles pratiques, sachant qu'un peu de théorie et de calculs lui auraient épargné 90 % de son travail.*

**3 - Le Black-out**, tant redouté par les électriciens de réseaux, est l'accident maximum qui peut survenir dans les grands réseaux électriques interconnectés, s'étendant maintenant sur plusieurs pays. Dans un réseau subissant une pointe de consommation élevée, toutes les centrales disponibles produisent, les lignes de transport sont chargées près de leur maximum, mais si l'un de ces éléments disjoncte par suite d'un accident, toute la puissance que cette ligne transmettait ou produite par une centrale se reporte sur d'autres lignes, qui risquent elles-mêmes de ne pouvoir supporter cette surcharge et vont déclencher dans un temps plus ou moins long si les opérateurs de réseaux n'arrivent pas à résoudre rapidement le problème par divers moyens, dont les délestages et l'isolement de certaines parties du réseau.

Lors d'un fonctionnement sous forte charge, on peut comparer un réseau à un château de cartes, ou jeu de dominos, la mise hors service brusque et inopinée d'un élément, une carte qui tombe, tout le reste s'effondre instantanément par action des automatismes de protection.

Le grand problème après un black-out est la reprise du service, inévitablement progressive et lente, des dizaines ou centaines de centrales de production qu'il a fallu laisser tourner à vide ou parfois arrêter. Chaque centrale doit être reconnecté individuellement au réseau suivant un processus de synchronisation de sa fréquence avec celle du réseau. Le réseau de distribution ne peut être reconnecté que par fractions. Cela demande des heures.

Sommairement, un réseau de transport national est piloté simultanément par des automatismes de contrôle et protection mesurant les grandeurs électriques, puissance, tension, fréquence, par des programmes journaliers informatiques du fonctionnement des centrales et des opérateurs de dispatching.

En France, le réseau de transport comprenant les lignes de 63 à 400 kV est maintenant géré par RTE, *Réseau de Transport Électrique* qui assure d'abord la programmation pour le lendemain de la fourniture d'énergie assignée aux centaines de centrales des différents producteurs, EDF étant le principal, ceci en fonction des prévisions de consommation annoncées, statistiques et météo. Ensuite RTE assure la régulation en temps réel en fonction des différences survenant entre la consommation instantanée réelle et celle prévue la veille, en général inférieures à 2%, mais qui augmente avec l'importance des énergies intermittentes et aléatoires, éoliennes et solaires, non programmables ni commandables.

Le black-out est un accident particulièrement grave dans la marine. Un navire a un réseau électrique complètement indépendant, ne pouvant attendre de secours électrique de nulle part. De rares exemples de navires ne pouvant même plus manœuvrer en mer, ont imposé aux concepteurs des réseaux de navires des contraintes sévères. La plus classique est ce qu'on dénomme la redondance d'ordre 2, c'est-à-dire le doublement en deux systèmes indépendants ; pour l'électricité deux générateurs arrière et avant, normalement interconnectés, mais séparables en quelques fractions de seconde. Idem pour la propulsion, toujours au moins deux moteurs et hélices, bâbord et tribord. Idem en aviation, sauf les monomoteurs !

Les causes des accidents sont parfois surprenantes. J'ai été amené à découvrir, lors d'une expertise, qu'un black-out avait été provoqué par l'incendie dans le tableau électrique principal du Marion Dufresne, cargo desservant l'Antarctique. Un arc de court-circuit s'y était développé suite à l'électrocution puis carbonisation d'un rat, qui s'était introduit en montant par les amarres dans un port.

Les grandes pannes de réseau ou black-out sont relativement fréquentes, malgré des progrès pour leur prévention. Après celle de New York, la France fut aussi touchée le 19/12/78, 45 millions de personnes coupées pendant 4 heures, le Nord-est américain à nouveau touché en 2003, puis le 5/11/2006 ce fut l'Allemagne. Ce dernier black-out a été indirectement amplifié par le recours important aux éoliennes, dont la disponibilité faible est aléatoire. La coupure programmée à l'avance d'une ligne 400 kV en Allemagne de l'Est devait priver l'Ouest d'une production qui devait être relayé par celle des éoliennes, d'après les prévisions météo. Le vent ayant été trop faible, cette production a été insuffisamment remplacé par importation instantanée depuis la France, dont le réseau Est a dû déclencher en partie pour éviter un black-out général qui aurait touché toute l'Europe de l'Ouest.

#### **4 - Le système Thury**

RENÉ THURY - *Transmission de force motrice à grande distance par courant continu à haute tension* – Bulletin Association suisse des électriciens, n°5 mars 1930, 19 p.

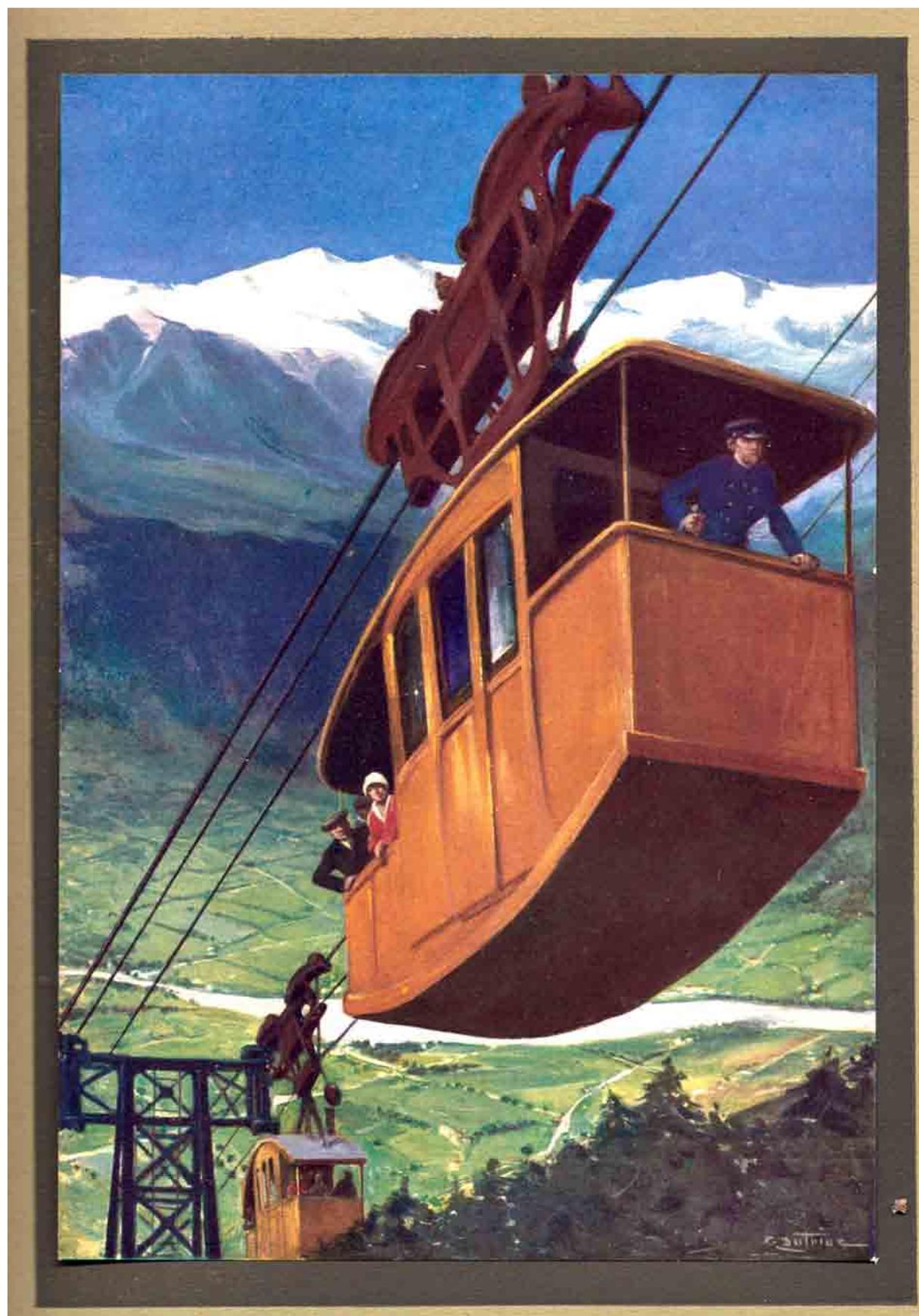
En allemand, conférence à Berlin par K. SULZBERGER, ETZ 1930 n°4 p.114.

Quelques matériels de la liaison Moutiers-Lyon ont été conservés au Musée Ampère à Poleymieux

#### **5- CCHT – Guide pédagogique par AREVA :**

[www.areva-td.com/solutions/liblocal/docs/System/HVDC\\_for\\_beginners.pdf](http://www.areva-td.com/solutions/liblocal/docs/System/HVDC_for_beginners.pdf)





Téléphérique de l'Aiguille du midi 1910-1954

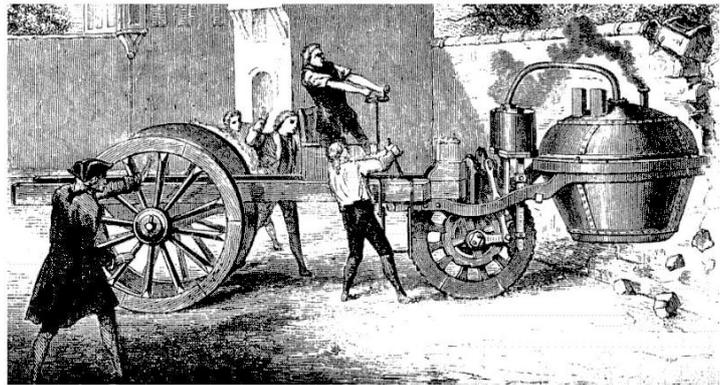
## 5 – Locomotion électrique

Se déplacer plus vite et mieux qu'avec ses jambes, transporter des charges plus facilement que sur son dos, ce sont des besoins fondamentaux que l'homme n'a résolu que récemment, il y a quelques millénaires. Ce fut d'abord avec des animaux, dont le cheval, puis après l'invention de la roue, le char tiré par le cheval (1). Enfin la vapeur, issue du charbon, faisait entrer le monde dans une civilisation basée sur l'énergie, d'abord pour les transports terrestres et maritimes, peut-être aériens.

L'énergie électrique y apporta ses propres qualités, mais limitées par le fort handicap de sa production, sans possibilité de stockage adapté.

### À l'origine, la locomotion à vapeur

Il y a trois siècles, Papin, Newcomen, Watt, inventaient une *machine à feu*, le premier moteur, générateur d'énergie mécanique, qui déclencha la révolution industrielle. Il fonctionnait avec le charbon des mines et servait précisément à améliorer leur exploitation, en actionnant des pompes d'extraction des eaux qui envahissaient parfois les galeries en Angleterre. Logiquement, on pouvait aussi l'utiliser pour tracter des charges lourdes en l'installant sur un chariot.

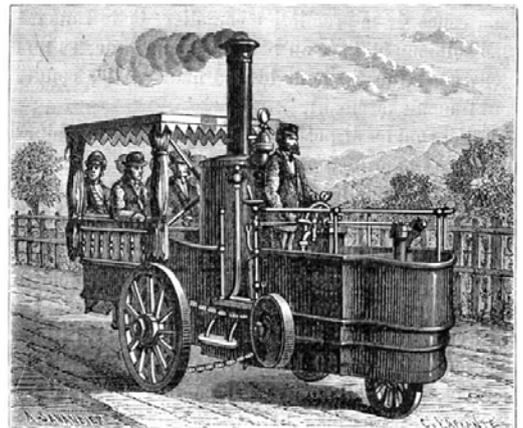


a

Fardier à vapeur de Cugnot - 1771

L'ingénieur militaire d'artillerie Joseph Cugnot obtint les crédits pour construire en 1771 ce premier véhicule auto-mobile, un *chariot à feu* de 3 t, capable de transporter 4 t de canons, à la vitesse de 2 à 3 km/h, un peu moins vite qu'un attelage de chevaux. Le prototype fonctionnait, mais un jour, le *chauffeur* de la chaudière ne réussit pas à couper la vanne de vapeur et l'engin défonça un mur (a). L'expérience ne fut pas poursuivie. L'un des problèmes était la difficulté de faire rouler des charges lourdes sur des chemins de terre pierreux irréguliers. Par bonheur, ce *fardier de Cugnot* fut l'un des premiers objets industriels préservé au CNAM, Conservatoire national des Arts et Métiers, créé en 1794 par l'abbé Grégoire, révolutionnaire atypique. Plus tard, on vit apparaître d'étranges véhicules routiers à vapeur (b) qui tentèrent sans grand succès de remplacer le cheval.

Le développement du moteur à vapeur fixe s'amplifia après 1820. Cependant pour le rendre mobile et l'adapter à la traction des charges, l'un de ses inconvénients était son poids ; à celui de la machine s'ajoutait la réserve d'eau et celle du charbon. Déjà dans les mines, le sol irrégulier des galeries avait été aménagé avec des ornières ou bandes de roulement en bois puis en fer, facilitant le roulement des

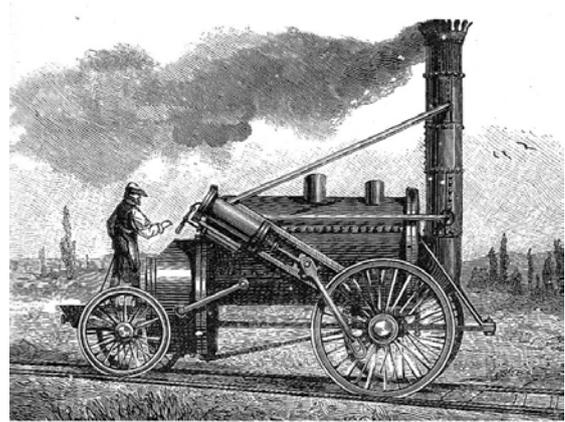


b

Locomotive routière à voyageurs.

chariots lourds pour l'évacuation du charbon tirés à bras d'homme ou mieux par des chevaux. D'où l'origine du rail.

La conjugaison de ces deux techniques donna naissance au **chemin de fer** : le rail en acier permettant le roulement de fortes charges tractées par une locomotive inévitablement lourde. On attribue un premier essai à l'anglais R. Trevethick vers 1804. Après plusieurs prototypes, le premier train régulier fut celui de Darlington à Storkton en 1829, tracté à 56 km/h par *La fusée*, locomotive mise au point par George Stephenson. (c).



c La Fusée, première locomotive Stephenson - 1829

En France, où Seguin avait amélioré les chaudières, un train transportait en 1830 le charbon de St Etienne jusqu'à Lyon. La première liaison destinée aux voyageurs fut celle de Paris à St Germain en 1837, empruntée au début uniquement par des audacieux ne craignant pas de mourir étouffés dans la traversée du tunnel à grande vitesse, 40 km/h. Par précaution, les portes des voitures étaient fermées de l'extérieur pour éviter qu'ils sautent du train, affolés lors des pointes de vitesse à 50 à l'heure.

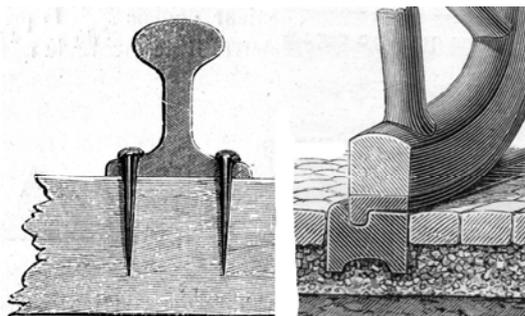
Nous savons le développement impressionnant du chemin de fer à vapeur dans le monde tout au long du XIX<sup>E</sup> siècle, déclenchant une intense circulation des matières, biens et personnes, clefs du développement industriel. Il remplaça progressivement les diligences qui transportaient les voyageurs, à 5 km/h, de ville en ville sur de mauvais chemins pierreux.

Mais une variante du chemin de fer apparut, à petite échelle, et le devança même nettement dans la traction électrique.

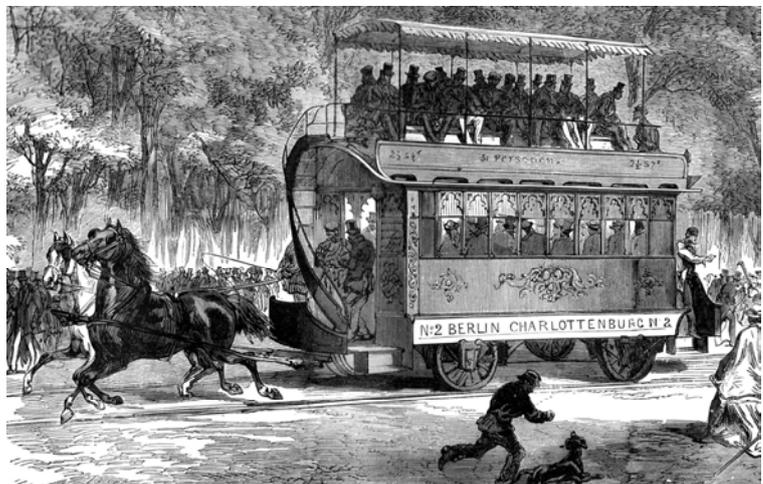
## Le tramway

Dans les villes s'imposait le besoin de transports collectifs, assurés par des véhicules prévus pour une vingtaine de personnes, tractés par des attelages de plusieurs chevaux et roulant sur un sol toujours irrégulier, parfois pavé (2). Les inconvénients de ce roulage, inconfort, charge et vitesse limitée amenèrent les municipalités à envisager de faire rouler ces véhicules sur des rails comme le chemin de fer. L'essai fut fait en Amérique à New York, mais les rails de chemin de fer, saillants sur une chaussée utilisée par toutes sortes de véhicules, provoquèrent de telles protestations que le système fut rapidement abandonné.

L'idée évolua et l'on chercha des solutions. À la place du rail saillant de chemin de fer, type Vignole (*edge rail*), le français Loubat conçut un **rail plat** (*tram rail*) qui devint celui du tramway, non saillant sur la chaussée. La jante de la roue assurait le



d Rail de chemin de fer- Vignole Rail de tramway - Loubat



e Tramway à chevaux de Berlin - 1865

guidage en pénétrant de 3 à 4 cm sous la

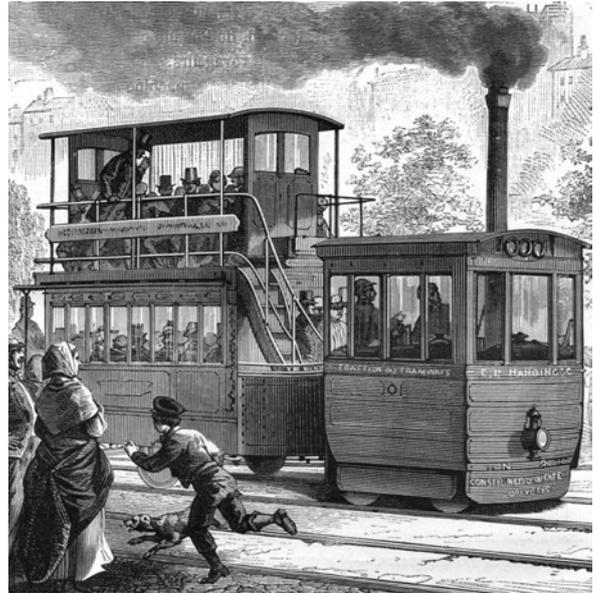
bande de roulement, au niveau du sol (d). Le système fut adopté dans toutes les grandes villes d'Europe à partir de 1865. Il permettait des véhicules plus lourds, mieux suspendus et nécessitant moins de chevaux pour les tracter, sauf dans les rues pentues (e). On dénombrait 87 compagnies de tramway à chevaux en 1875 dans le seul état de New York.

L'évolution prévisible fut de remplacer les chevaux par une **locomotive à vapeur**, plus petite que celle des chemins de fer. Un peu dans tous les pays apparurent alors ces petits trains urbains, mais les avantages des chevaux-vapeur sur les chevaux à crotin étaient faibles pour un coût souvent plus élevé (f). Comme en Amérique, ce petit train allait assez vite, un cavalier le précédait en sonnant de la trompe, pour éviter les accidents ; un sifflet à vapeur le remplaça.

Une autre solution originale d'origine américaine apparut, utilisant la vapeur mais sans chaudière, ni charbon, ni fumée, le tramway à **eau surchauffée**. À chaque extrémité de la ligne, on transférait de l'eau à 200°C dans le gros réservoir de la locomotive sous la pression de 15 atmosphères. Complicé, le système resta marginal, bien que le Français Francq eût amélioré le rendement par un condenseur pour ce tramway de Rueil à Marly (g), essayé aussi entre Lille et Roubaix.

La machine était lourde, 1 tonne d'eau surchauffée permettait un parcours de 10 km en stockant 180 kWh, mais le rendement ne devait guère dépasser 10 %

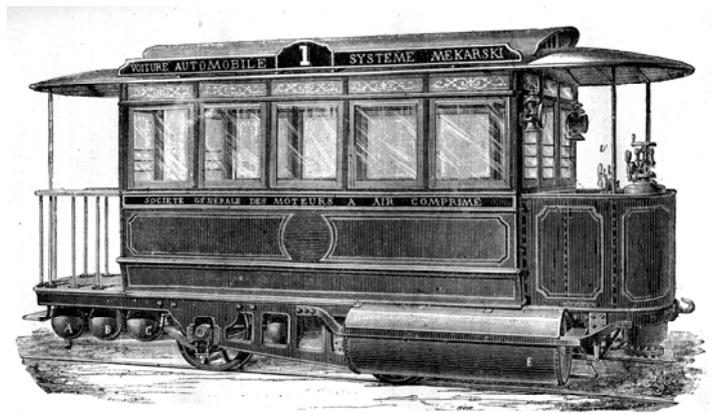
L'**air comprimé** qui concurrença l'électricité à ses débuts comme vecteur d'énergie a été distribué dans Paris avec quelques avantages. (ch.IX-1 c.13) Son aptitude à se stocker à forte pression dans des réservoirs fut aussi exploitée pour la traction de tramways à air comprimé même après l'apparition de la traction électrique. D'importants réservoirs étaient disposés soit sous la caisse des voitures, soit sur le toit et rechargés assez rapidement dans les stations d'extrémité de la ligne. Bien que le rendement global n'était que de 20 à 30%, il était supérieur à celui de la vapeur. Le système Mekarski adopté par la Compagnie générale des omnibus circula à Paris sur trois lignes entre 1880 et 1884, Louvre à St Cloud, Sèvres et Versailles (h). À Nantes, le tramway à air comprimé système Conti, sous 50 atmosphères, circula de 1870 à 1917.



f Essai de remorqueur à vapeur -tramway de Paris



g Tramway avec locomotive à eau chaude

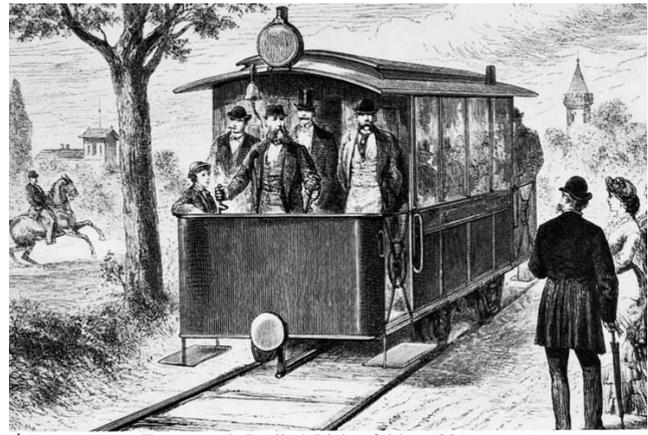


h Tramway à air comprimé, système Mékarski - 1884

### Le tramway électrique

Faire rouler des tramways avec l'énergie électrique devenait possible avec l'apparition des moteurs Gramme puis Siemens, à la fin de la décennie 1870.

À l'exposition de Berlin de 1879, un petit train transportait les visiteurs (IV-2) et début 1881 Siemens, innovateur en la matière, mettait en service à Berlin le premier tramway électrique de Lichterfelde, long de 2,5 km (j). Sur la gravure n'apparaît pas de système d'alimentation électrique pour son moteur de 5 ch ; c'est qu'il était assuré par les deux rails de roulement lui-même, simplement isolé par les traverses en bois.



Tramway de Berlin à Lichterfelde - 1881

Malgré la tension relativement basse de 180 V, cela posait des problèmes pour la traversée des chevaux, s'ils posaient les sabots simultanément sur les deux rails. Le système était compliqué par l'isolement nécessaire des roues de chaque côté. Aussi la même année, à l'exposition de Paris, une voiture de démonstration semblable prenait son énergie par frottement sur un fil aérien.

À l'exposition d'Anvers en 1885 étaient présentés divers systèmes de tramways qui devaient remplacer les chevaux : à vapeur, à air comprimé, par la vapeur produite par l'eau surchauffée, à l'électricité produite par des accumulateurs, mais pas encore au moyen d'un fil aérien, système qui ne semblait pas évident. La technologie des éléments électriques du tramway se précisa en une dizaine d'années à la fin du siècle :

### Le moteur

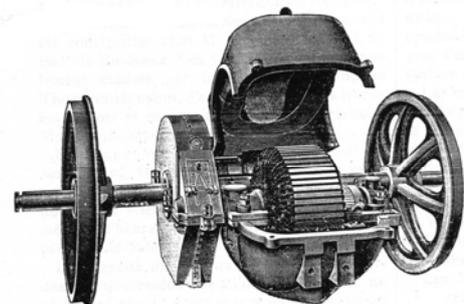
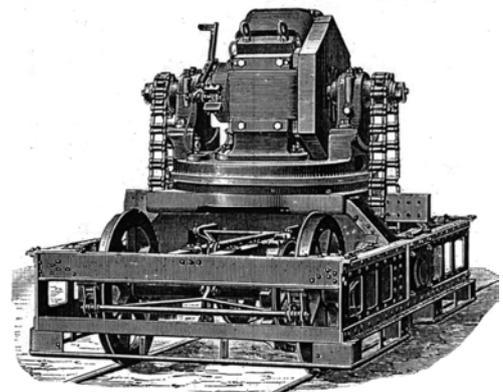
Avec cette première application dans la traction, les électriciens découvrirent l'intérêt du moteur en continu dont les inducteurs étaient connectés en série avec l'induit, ce qui lui confère un fort couple de démarrage, indispensable pour mettre en vitesse de très lourdes charges

En moyenne, une puissance globale de 20 à 25 ch convenait pour tracter une voiture pour 50 personnes, avec 2 moteurs. Après le démarrage, il fallait un effort de traction de 10 à 15 kg par tonne de poids. Ils étaient alimentés en 500 V continu, tension qui permettait de faire fonctionner plusieurs rames sur des lignes de 10 km environ à une vitesse de 10 et 25 km/h en palier. La station centrale d'alimentation était si possible située à mi-parcours pour réduire chute de tension et pertes.

Au début, chaque moteur était installé au-dessus du truck, châssis supportant deux essieux (k) commandés par chaînes, mais qui diminuait la place utile pour les voyageurs dans la caisse reposant sur deux trucks.

En Amérique, les deux principaux constructeurs, Thomson - Houston et Sprague étudièrent des moteurs *waterproof* entraînant directement l'essieu tracteur. (l)

Quelques tramways ont été alimentés en courant alternatif polyphasé utilisant des moteurs asynchrones plus économiques.

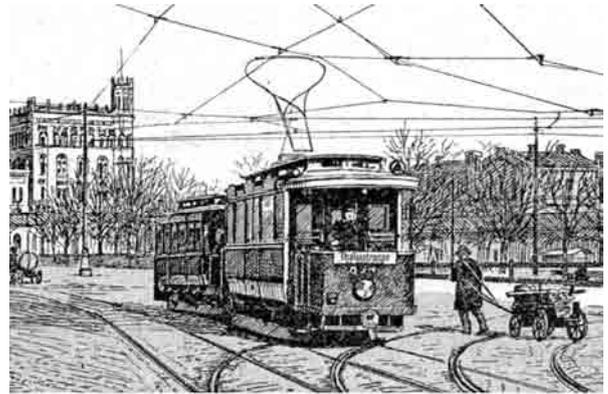


Moteur Thomson-Houston waterproof pour tramway

Les essais non-concluants, nécessitaient une alimentation de courant par deux fils caténaires, plus le rail à la terre.

### L'alimentation électrique

Le système le plus utilisé fut le **conducteur aérien** suspendu à des pylônes avec retour du courant par les rails. Le captage du courant était effectué à l'extrémité d'une perche inclinée fixée au toit, le **trolley**, soit par une roulette, soit par un frotteur. Siemens équipa aussi plusieurs villes avec des tramways à archet (m), système proche de celui utilisé plus tard pour les chemins de fer.

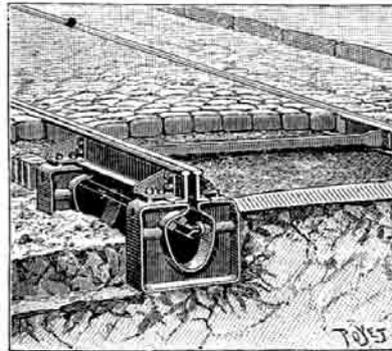


Tramway de Vienne à archet frotteur

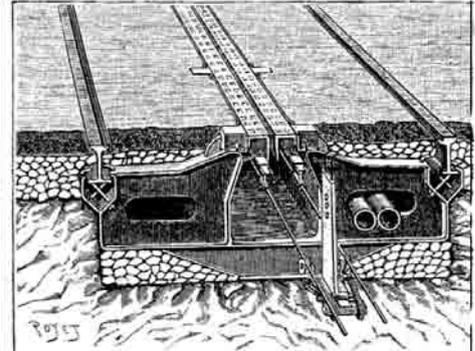
Le système à trolley restera le plus classique, simple et économique, avec un seul inconvénient, les fils aériens étaient peu esthétiques dans les villes.

Les édiles parisiens ayant décrété « *le trolley aérien ne pénétrera pas dans Paris* », il fallut chercher autre chose, placer le **conducteur en souterrain** dans une sorte de caniveau sous la chaussée, ouvert par une fente en long dans laquelle pénétrait le support plat de la prise de courant. Le frotteur à son extrémité glissait sur le conducteur rigide supporté par des isolateurs. Ce système imposait des contraintes sévères : être indéformable aux charges lourdes – permettre écoulement rapide des eaux de pluie et d'arrosage – être facile à nettoyer – permettre le remplacement des isolateurs et conducteurs sans démolir la chaussée – la fente devait être étroite pour que passants et roues ne puissent y pénétrer. À Paris, on imposa 29 mm maximum, et en Amérique 20 mm, car on commençait à circuler en vélocipède.

Les inventeurs furent nombreux, plus d'une dizaine de systèmes sont recensés dans un manuel de l'époque (3). Sans entrer dans les détails, la gravure) en montre la complexité, plus accusée encore aux croisements et aiguillages.



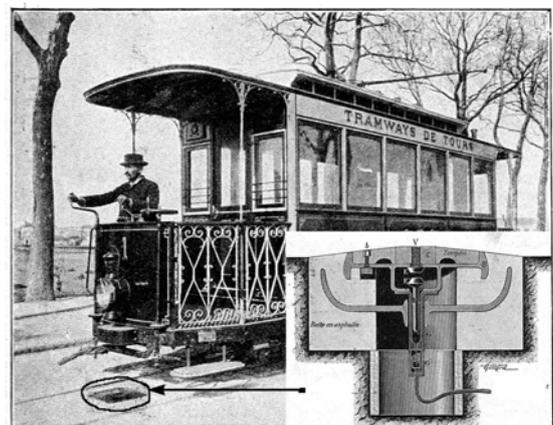
n Système Siemens et Halske établi à Budapest.



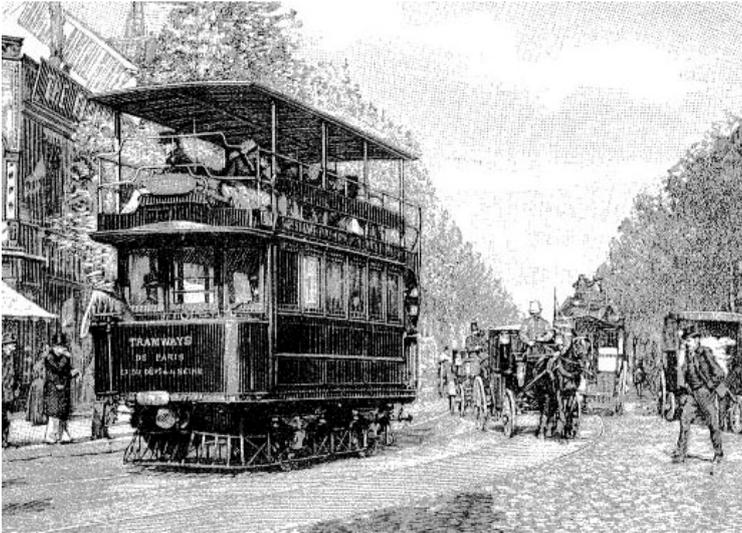
Système Love, appliqué en Amérique

D'autres proposèrent une solution de conducteurs sous la chaussée, mais sans ce caniveau d'entretien difficile et dangereux. Les prises de courant étaient des **plots affleurants** juste au niveau du sol, qu'un long frotteur sous le véhicule mettait sous tension juste à son passage. Dans le système assez simple Diatto, le frotteur est en fer et aimanté par des électro-aimants. Les plots sont à une distance un peu inférieure à celle de la bande frotteur et une tige en fer interne trempant dans un godet de mercure est attirée par la bande, mettant la surface du plot sous tension.

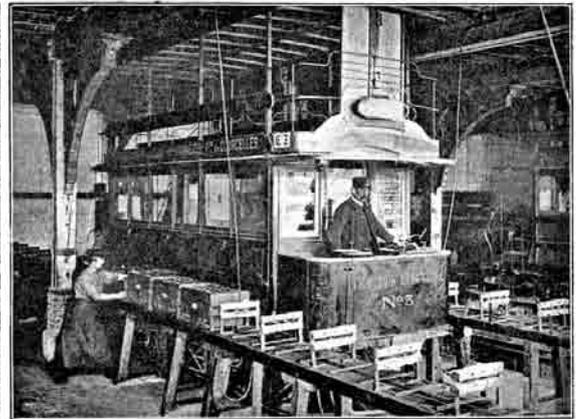
Le système fut utilisé sur certaines lignes parisiennes et à Tours. (o)



Tramway à pavé de contact système Diatto - Tours



p Tramway à accumulateurs - place Clichy à Paris - 1892



q changements des batteries d'accumulateurs

Une autre solution pour se passer de trolley ou conducteurs souterrains était le **tramway à accumulateurs** qui malgré sont lourd handicap, poids et recharge, présentait certains avantages, aussi il fut adopté dans des cas particuliers, en particulier pour 3 lignes parisiennes. (p) Les voitures roulaient en moyenne à 12 km/h, pesaient en charge 13 500 kg dont 2600 kg d'accumulateurs et 3500 kg de voyageurs. Pour la recharge, la solution fut de prévoir un nombre de batteries très supérieur à celui des véhicules, stockées et rechargées en bout de ligne. Un système de manutention pratique était prévu, limitant le temps d'échanges d'un jeu de batteries à une quinzaine de minutes. (q)

### Développement du tramway électrique

Le développement a débuté lentement en Europe, en 1889 seulement 9 lignes étaient en service ; une seule en construction en France à Clermont-Ferrand. Alors qu'en Amérique ce fut un véritable rush, une centaine de lignes totalisant 1000 km sur laquelle circulaient 550 voitures. Presque toutes étaient électriques avec prise de courant sur un conducteur aérien.

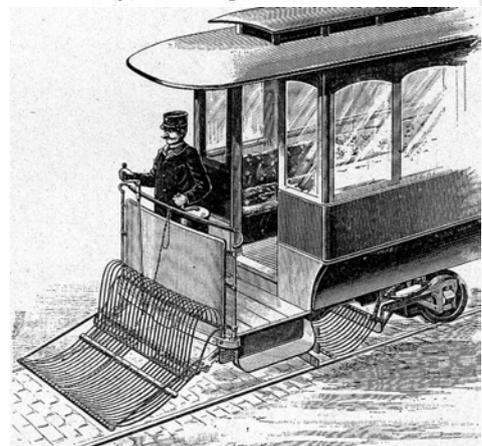
Peu après, en 1893, l'Europe totalisait 600 km, soit 64 lignes dont 16 en Allemagne, 16 en Angleterre et Irlande, 12 en France, 8 en Suisse. L'Amérique comptait alors 12 000 km de lignes où circulaient 17 000 voitures électriques. La traction animale par chevaux y subsistait avec encore 5000 km de lignes tirant 15000 voitures. Les systèmes à vapeur ou air comprimé étaient rares.

Malgré une vitesse relativement faible, il devait y avoir des accidents de personnes et dans les rues à forte circulation de piétons, les tramways étaient équipés à l'avant d'un filet de protection (r). Dans les régions froides, on prévoyait des voitures chasse neige (s)

La fin du XIX<sup>e</sup> siècle fut le début d'une forte expansion du tramway dans toutes les villes, mais aussi hors des villes se multiplièrent des lignes de quelques dizaines de km, avec des rails type chemin de fer mais à voie étroite, généralement 1 m.



s Tramway chasse neige au Minnesota



r Filet protecteur de piéton

La première moitié du XX<sup>e</sup> siècle fut l'âge d'or pour ce moyen de transport collectif urbain et péri-urbain. Après WW2, l'automobile devenant accessible à un plus grand nombre envahit les villes et les tramways devinrent progressivement obsolètes, parfois remplacés par des trolleybus.

L'on sait comment le tramway prit une revanche sur l'auto dans les années 1990, avec des véhicules sans innovations de principe, mais plus perfectionnés, avec une carrosserie modernisée.

### Le trolleybus

Lorsque les rues et routes commencèrent à être aménagées pour la circulation automobile, c'est-à-dire goudronnées, il devenait envisageable dans les années 1930 d'y faire circuler des autocars sur pneus, avec moteur à essence. Pour les services réguliers, le moteur électrique alimenté par deux conducteurs aériens devenait possible, le *trolleybus*. Le pneu demandait un effort de traction près du double que la roue d'acier sur rail, mais ce n'était pas un problème. On vit alors se développer des réseaux de trolleybus, concurrents du tram, avanta-gés sur plusieurs points importants : l'investissement bien plus faible, surtout celui de la construction de la voie ferrée, la possibilité simple et peu coûteuse de modifier l'itinéraire de la ligne en fonction de l'évolution des besoins (4) (t).



t Trolleybus routier - 1932

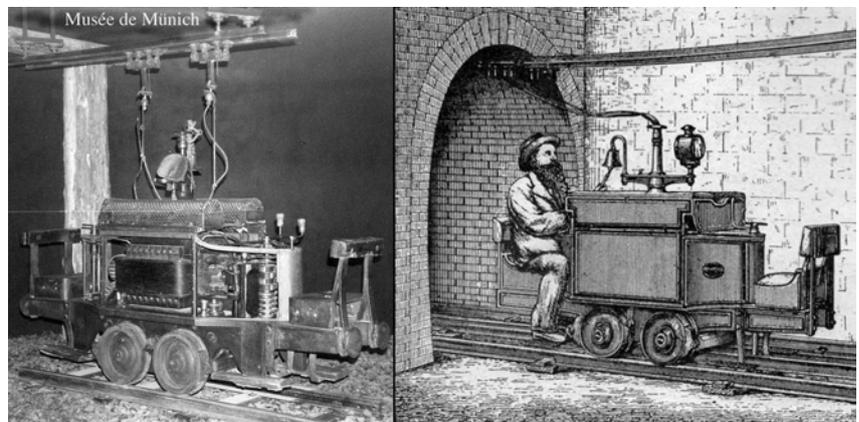
### Le chemin de fer électrique

Dès la commercialisation des premiers moteurs, quelques industriels avaient commencé à construire des petites locomotives électriques pour leurs usines, ainsi C.Felix et J.Chrétien pour la sucrerie de Sermaize, (IV-2). En Allemagne, Siemens cherchait à améliorer l'évacuation du charbon des mines de Hohenzollern conçut une petite locomotive électrique, remplaçant les hommes ou les chevaux (u). La voie avait 800 m de longueur, la locomotive alimentée sous 350 V et 37 A remorquait 12 wagonnets de 900 kg à 5 km/h. L'électricité était captée par un petit chariot roulant sur un rail fixé au plafond de la galerie. Une autre installation fut réalisée pour la mine de Zaukerode, près de Dresde, la locomotive tirait 17 wagons et évacuait 30 t de charbon par jour.

C'était un début de faisabilité qui amorça l'essor du tramway.

Bien qu'assez semblable, le chemin de fer s'en différençait d'abord par sa voie obligatoirement en site propre, excluant tout autre circulation en raison de son rail saillant, ensuite par sa vocation de transport de voyageurs et marchandises à des vitesses élevées, 60 jusqu'à 100 km/h, de ville en ville, éloignées de dizaines à centaines de km.

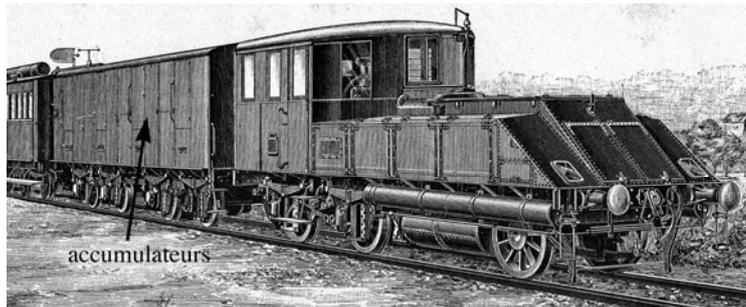
Conçu pour fonctionner à la vapeur, solution satisfaisante si ce n'était son mauvais rendement, on ne pouvait envisager de la remplacer par la traction électrique qu'à partir du moment où elle était capable de fournir une forte puissance transportable à des dizaines ou centaines de km par l'intermédiaire de sous-stations réparties tout au long du parcours pour alimenter les caténaires. Conditions qui ne commencèrent à être possibles qu'après 1890.



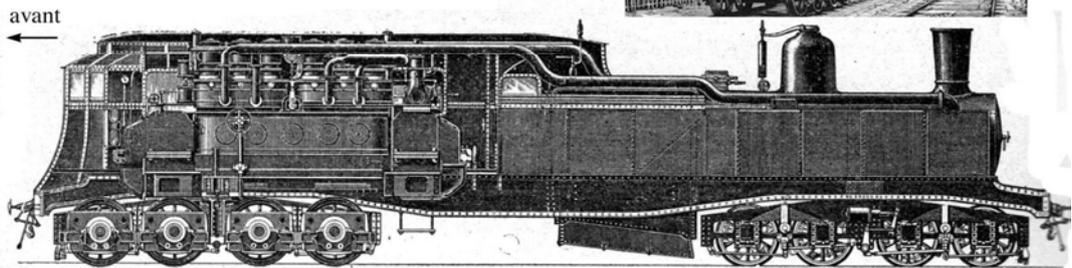
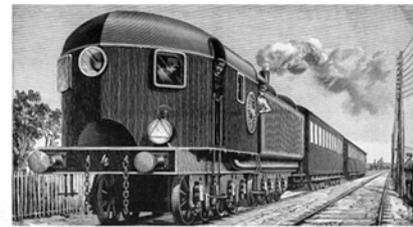
u Locomotive Siemens pour les mines de Hohenzollern - 1882

Mais alors que le tramway électrique se multipliait très rapidement le chemin de fer électrique fut long à se développer. De sérieuses difficultés technologiques et économiques se présentaient avec un net changement d'échelle. Le tramway se satisfaisait de moteurs d'un vingtaine de chevaux alimentés en 500 V, à quelques km du générateur électrique de courant continu ; pour le chemin de fer, il fallait des centaines ou milliers de chevaux à fournir à des dizaines puis centaines de km. Le coût de l'équipement était prohibitif, des lignes en conducteurs aériens supportés par des pylônes tous les 50 à 80 m et alimentés par des sous-stations tous les 5 km pour 500 V.

### Locomotives autonomes



v Locomotive à accumulateurs-système Auvert - Cie PLM -1897



w Locomotive vapeur-électrique Heilmann - 1892

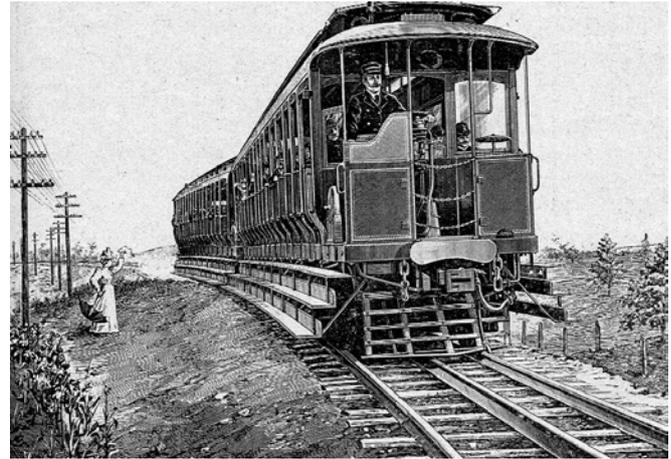
Pour se passer du coûteux conducteur aérien d'alimentation tout le long de la voie, il fallait rendre la locomotive électrique autonome, cela imposait qu'elle transporte sa source d'énergie primaire. Une solution était la batterie d'accumulateur, essayée par le Cie PLM. La machine comportait 2 moteurs de 600 ch au total, alimentés par 36 éléments d'accus à l'avant, plus 192 dans un fourgon remorqué (v). Aux essais, elle a remorqué un train de 150 t, plus son propre poids de 41 t, à 45 km/h, puis a été reléguée sur une ligne secondaire.

Dans le même esprit, une autre solution originale, assez étonnante, était de produire l'énergie électrique à partir d'un moteur à vapeur embarqué, la propulsion seule étant électrique. Cette **locomotive électrique hybride** conçue par J.J.Heilman est sortie en 1892. Longue de 16 m, elle pesait 110 t. Avec ses 2 bogies à quatre essieux, elle pouvait prendre des courbes de faible rayon. (w) Le moteur à vapeur de 600 ch actionnait une dynamo Brown donnant 1000 A sous 400 V, répartis sur les moteurs des huit essieux. Cette *Fusée électrique* essayée en 1893 entre Paris et Le Havre remorquait un train de 90 t à 90 km/h en palier, ralentissant à 60 km/h dans les fortes rampes d'Harfleur. Elle fonctionna sur la ligne Paris en 1894 et deux nouveaux modèles sortaient des ateliers Cail en 1896.

Malgré des avantages certains, sa complexité fit qu'elle n'eut pas de progéniture. Pourtant elle mettait en évidence la souplesse de la propulsion électrique et son adaptation naturelle à toutes les vitesses de rotation. Lorsque le diesel remplacera complètement la vapeur pour les lignes non électrifiées, ce sera le plus souvent avec des automotrices diesel-électrique, système hybride semblable à la locomotive Heilmann, mais le pétrole est plus pratique que le charbon et la vapeur.

### *Le troisième rail*

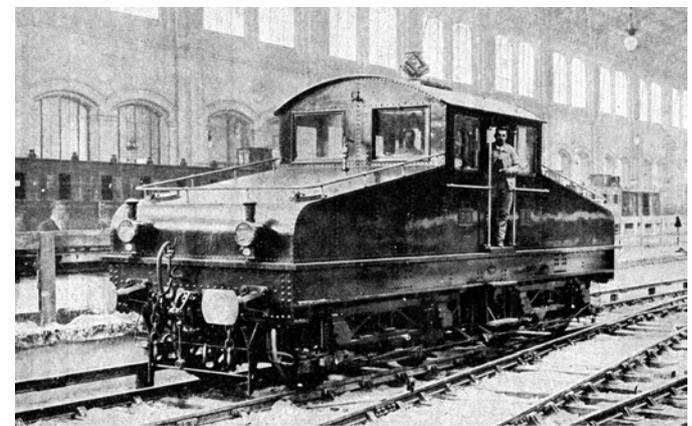
Le système fut lancé, sinon inventé, en Amérique dans le Connecticut, par une compagnie qui voulait relier New-Haven à Hartford, distant de 12 km, avec moins de frais qu'avec le trolley aérien. Ce rail conducteur serait placé sur des blocs de bois créosotés considérés comme isolants, éventuellement coupé aux croisement, les deux tronçons étant reliés par un câble isolé souterrain. (x) Des électriciens démontraient qu'avec 600 V les pertes seraient telles que le train n'arriverait pas à démarrer.



x Chemin de fer électrique à troisième rail - 1897

Le succès fut complet, même par temps de pluie. La sécurité imposait que ce système ne soit adopté que sur les lignes inaccessibles aux piétons et animaux. Aussi depuis 1897, on ne parlait plus que du troisième rail en Amérique. Certains y voyaient la solution de trains à grande vitesse reliant Philadelphie à New York en 36 minutes, les 85 miles étant parcourus à une vitesse maximale terrifiante de 275 km/h dans les lignes droites.

La prise de courant par troisième rail était adaptée à des lignes interurbaines de quelques dizaines de km au plus, à des voies sous tunnel où la fumée du charbon était peu supportable. Ce fut le cas des entrées dans Paris sous tunnel des lignes venant de l'Ouest et de la liaison entre les gares d'Orsay et Austerlitz pour lesquelles furent conçues les premières grosses locomotives électriques (y). L'expérience fut poursuivie avec l'électrification d'une première ligne de banlieue, Paris-Juvisy.



y Locomotive électrique de la Cie P.O., Paris Orléans

Ce système fut adopté aussi pour les petites lignes de montagne à fortes pentes, (z) dont certaines étaient déjà équipées avec une locomotive à vapeur pousive avec crémaillère centrale ; en Suisse, on disposait d'une hydroélectricité abondante, plus que de charbon.



z Chemin de fer à crémaillère dans les Alpes

En Europe, ce troisième rail en 500 puis 600 jusqu'à 750 V continu fut adopté pour les chemins de fer métropolitains souterrains, il permettait par surcroît de réduire au minimum la hauteur des tunnels. Le premier, celui de Londres datant de 1863, donc à vapeur, fut progressivement électrifié. La première ligne du métro de Paris fonctionna en 1900.

Mais aucune électrification de voie ferrée à ligne longue, avec des conducteurs aériens, ne fut entreprise dans le monde avant la fin du siècle.

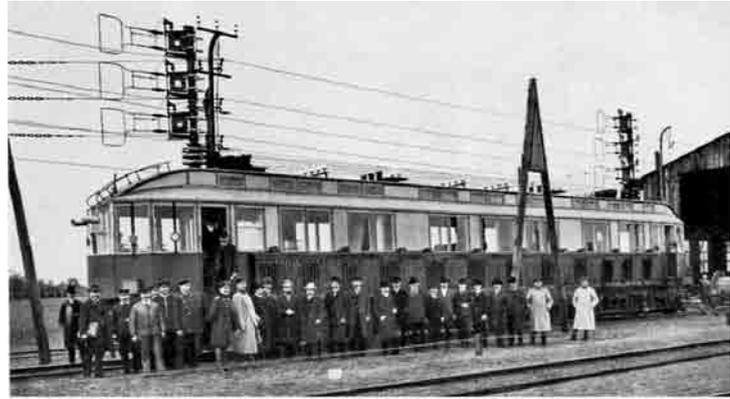
### Un développement lent et hésitant (1900-1950)

Une expérience importante eu lieu en 1903. Les deux grands électriciens allemands, Siemens et AEG obtinrent de la Société des chemins de fer la possibilité d'essayer chacun une automotrice sur un tronçon en ligne droite de 23 km, entre Zossen et Marienfeld. Un système de trois caténaires latérales, en alternatif triphasé à 50 Hz fut installé pour l'occasion. (za)

Alors que les meilleures locomotives à vapeur ne dépassaient guère 100 km/h, les deux prototypes concurrents atteignirent 203 et 210 km/h. La démonstration était faite, l'électricité pouvait faire rouler des trains à très grande vitesse, bien sûr dans des conditions très particulières au début.

Cet essai fit réfléchir les électriciens qui pensaient que seul le continu était adapté à la traction, car trois caténaires, c'était impensable.

Il faudra attendre 50 ans pour que la SNCF fasse rouler un train en courant continu 1500 V à 331 km/h, sur une ligne droite dans les Landes.



za Automotrice rapide Siemens - essai à 210 km/h en 1903

À la société suisse Oerlikon, l'ingénieur Hans Behn Eschenburg étudia en 1904 le problème du moteur de traction en alternatif monophasé à vitesse variable et fort couple de démarrage, indispensable pour la traction. Le moteur asynchrone mono ou polyphasé classique étant inadapté. Il s'inspira du moteur à répulsion d'E. Thomson, perfectionné par Latour (IV-3), et conçut un moteur- graduateur particulier mais qui nécessitait une fréquence faible. La valeur de 16 Hz 2/3 fut adoptée. Parmi les premières installations, la ligne du Simplon confirma en 1907 la validité du système

Pendant cette première moitié du XXe siècle, les compagnies de chemin de fer ont alors hésité entre **deux techniques d'électrification** dont le bilan avantages et inconvénients étaient proches.

– *Le courant continu* : il était plus simple et ses moteurs bien connus et plus efficaces, mais on ne pouvait pas modifier sa tension ni l'élever au-dessus de 1,5 puis 3 kV, limite du moteur série à collecteur. Les sous-stations de production recevaient l'énergie en alternatif à haute tension, soit depuis des centrales, soit du réseau. Le courant continu était produit à partir de deux commutatrices 750 V en série pour 1500 V et jusqu'à 3000 V en 1935 avec des redresseurs à vapeur de mercure. Ces sous-stations étaient réparties le long des voies ferrées tous les 15 ou 20 km et alimentaient les caténaires suspendues aux poteaux, éventuellement par des conducteurs aériens en parallèle. Les moteurs de locomotive étaient à inducteurs en série, ce qui leur donnait un bon couple de démarrage et à basse vitesse, impératif en traction.

– *Le courant alternatif* : Il avait sa facilité de changement de tension par transformateur, mais il fallait recourir à des moteurs spéciaux à collecteur, seuls adaptés au démarrage et aux basses vitesses. De plus la fréquence normale de 50 Hz était trop élevée pour ces moteurs, il fallait la diviser par trois, à 16 Hz 2/3. Les sous-stations recevaient l'énergie comme précédemment à 50 Hz triphasé et l'on a cherché au début à adapter simplement le niveau de tension par transformateur monophasé vers 10 ou 15 kV, pour alimenter les caténaires. Après abaissement de la tension sur la locomotive, les moteurs devaient être des moteurs spéciaux monophasés à collecteurs très peu répandus.

En effet, le triphasé avait été abandonné après quelques essais, nécessitant 2 sinon 3 caténaires avec ou sans les rails pour l'une des phases.

Mais en monophasé, les moteurs spéciaux à collecteur d'Oerlikon marchaient mal en 50 Hz, seulement en 16 Hz 2/3. D'où la nécessité dans les sous-stations d'un groupe tournant moteur-

alternateur pour y générer ce 16 Hz  $2/3$ . Néanmoins, le système avait l'avantage appréciable sur le continu de n'installer les s/stations qu'à 60 km de distance ou plus, de même des caténaires de section plus réduite.

L'idéal était de transmettre directement du 50 Hz monophasé à la locomotive qui le transformerait en continu 1500 V, solution qui ne fut techniquement possible qu'après les années 1950 avec de nouveaux redresseurs embarqués.

En France, Raoul Paul, dirigeant de la Cie des chemins de fer du Midi, couvrant le Sud pyrénéen (5) entreprit en 1908 l'électrification de son réseau avec la technique de l'alternatif 16  $2/3$  qui démarrait en Suisse, Allemagne et Autriche. La région était riche en possibilité de production hydroélectrique. Après une première réalisation entre Perpignan et Villefranche, trois lignes furent équipées en utilisant à titre d'essai des locomotives de plusieurs constructeurs étrangers. En Suisse, l'abondance des ressources hydroélectriques permettait un rapide développement de l'électrification.

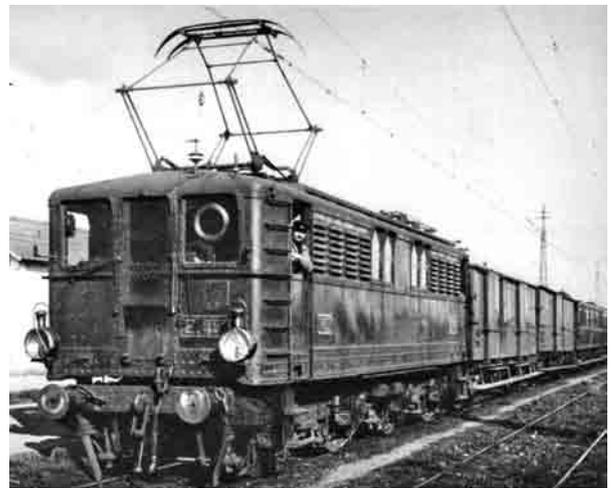
Cependant, le développement de l'électrification des chemins de fer dans le monde resta lent, sauf pour les lignes courtes interurbaines à forte fréquence de trains. La raison était le coût des investissements, alors que la vapeur donnait satisfaction.

Après WW1, circulaient dans le monde 1000 locomotives électriques pour 300 000 à vapeur. Aux Etats-Unis, les lignes électrifiées représentaient seulement 4000 km en 1,5 kV CC dans les banlieues urbaines, 1400 km en 3 kV et 1400 km en alternatif. Dans ce vaste pays aux très longues lignes ferrées ce sera le diesel qui remplacera la vapeur, mais très peu l'électricité, en raison du prix faible du pétrole produit dans le pays.

En France, en 1920, fut décidée de démarrer l'électrification du réseau. Un comité animé par Hippolyte Parodi fut chargé de choisir le système de tension à normaliser. Après études, ce fut le 1500 V en CC qui fut choisi, bien qu'en Europe, Allemagne, Suisse, Autriche adoptaient l'alternatif 15 kV - 16 Hz  $2/3$ , l'Italie le 3 kV CC après un essai de triphasé. On reprochait à l'alternatif les perturbations du réseau téléphonique dont les lignes suivaient les voies. Les pays qui avaient choisi de 3 kV CC au lieu du 1,5 kV se sont trouvé conforté dans cette option lorsqu'en 1930 sont apparu les redresseur à vapeur de mercure, réalisant bien plus facilement la conversion que les commutatrices.

Une conséquence amère pour la Cie du Midi pionnière fut la reconversion de son réseau et machines 12 kV CA en 1,5 kV CC.

La première grande installation à 1,5 kV fut l'électrification du PO en 1926 avec l'énergie des barrages du Massif Central. Le premier, Eguzon alimentait la première grande ligne de transport vers la région parisienne. La locomotive de 70 t, équipée de quatre moteurs de 350 ch, un par essieu, et 2 pantographes, était capable de tracter les trains de voyageurs à 100 km/h. (zb)



zb Locomotive électrique à pantographe -1930

La fusion en 1938 des cinq compagnies ferroviaires constituant la SNCF facilitera l'électrification.

En 1939, le réseau électrifié français s'étendait sur 3500 km, soit 8% du total, la Suisse avait électrifié la totalité de son réseau de 2000 km, l'Allemagne 3400 km, l'Italie 5000 km. (zc)

Après WW2, sous l'impulsion de Louis Armand, premier directeur de la SNCF, des essais de plusieurs systèmes en alternatif sont entrepris sur des lignes en Savoie pour rechercher une alimentation en alternatif, mais à 50 Hz qui simplifierait beaucoup l'alimentation des sous-stations. Une solution s'en dégage la transformation de tension à bord de la locomotive, suivie du redressement en continu par un nouveau modèle de redresseurs, des *ignitrons* américains.

L'électrification Paris Lyon déjà engagée en 1,5 kV CC est réalisée en 1950, simultanément à celle de la ligne Valenciennes – Thionville en 25 kV CA qui s'avérera un succès.

En 1958 les redresseurs au silicium vont remplacer les ignitrons et ouvrir la voie au premier TGV qui normalisera la tension de 25 kV à 50 Hz monophasé, abaissée et redressée sur la machine en courant continu, pour le classique et performant moteur série CC.

L'épopée bien connue du TGV se poursuivra, mais avec la nouvelle technologie de l'électronique de puissance, les thyristors, permettant de revenir à des moteurs en alternatif sans collecteur, synchrone ou asynchrone, plus économiques et durants.

Après cette longue, plus d'un demi-siècle, et laborieuse recherche du bon système d'électrification des chemins de fer, il semblerait que l'optimum soit atteint pour le XXI<sup>e</sup> siècle.

#### *Locomotion terrestre du futur*

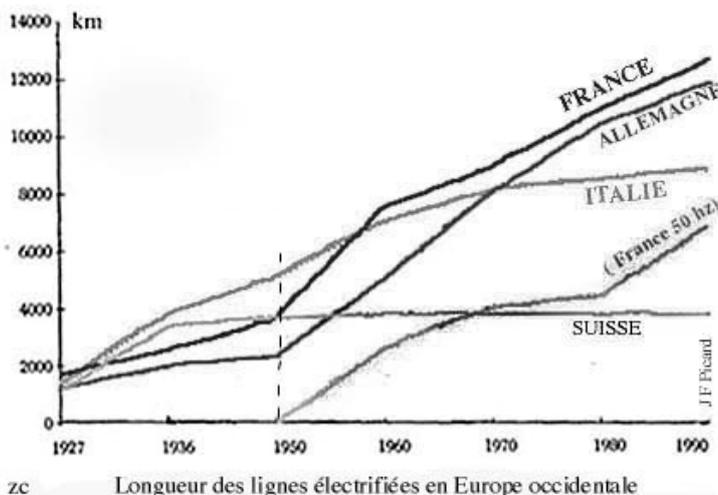
Pourtant, avant le TGV, apparaissaient en France dans les années 1970 les prototypes d'un train autonome à propulsion aérienne, sans rails ni roues, à sustentation par coussin d'air, l'aérotrain de Bertin, solution déjà adoptée pour des navires. Le système de sustentation, roues sur rails paraissait inadapté à la circulation de trains au-delà de 250 km/h. La propulsion était effectuée par un réacteur d'avion, bruyant, entraînant l'hélice de propulsion

Une société de construction électrique de Grenoble, Merlin-Gerin, substitua pour la propulsion électrique une idée datant de 1895, le moteur linéaire asynchrone, mais avec l'impératif d'une captation d'électricité. L'inducteur bobiné du moteur était sous la voiture, séparé par un faible entrefer avec l'induit constitué d'un simple rail de guidage en aluminium. Après plusieurs années de recherches, des difficultés techniques mal résolues, malgré le succès aux essais à 400 km/h, ce fut l'abandon pour diverses raisons, dont politiques (IV-3, c.15 - *Moteur asynchrone linéaire*).

Cet exemple illustre la difficulté rencontrée par les projets d'invention d'une nouvelle technique dépassant les performances, considérées comme maximales, du système éprouvé reposant sur une technique traditionnelle. Une compétition technico-économique et concurrentielle s'engage alors entre les innovateurs du nouveau procédé et les professionnels de l'ancien qui tentent alors de dépasser les performances de leur système, et y parviennent.

Plutôt que de prendre les risques inhérents à tout nouveau procédé, les décideurs préfèrent souvent l'amélioration des performances du procédé traditionnel, comme dans ce cas du train à grande vitesse. Ainsi on peut considérer que le TGV ne serait pas apparu aussi rapidement s'il n'avait pas été stimulé par la concurrence potentielle de l'aérotrain. Son atout majeur était la possibilité de rouler sur les voies normales du réseau, comme sur sa voie spéciale permettant les grandes vitesses.

L'idée du moteur linéaire fut cependant reprise, mais avec une sustentation magnétique, le MAGLEV de Siemens et des variantes asiatiques.



Le train est à la fois suspendu en lévitation et propulsé par des bobinages disposés sur la voie en regard de bobinages sur le train. Ces derniers étant supraconducteurs dans l'une des versions. Des lignes d'essais ont été installées en Chine et au Japon, néanmoins l'inconvénient d'une voie spéciale et surtout le coût font hésiter la généralisation du procédé. Le gain de vitesse par rapport au système TGV, relativement classique, justifie-t-il les risques techniques et financiers d'une rupture technologique aussi importante ?

Dans tout nouveau projet de développement, une règle d'expérience serait que la nouvelle technique doit être nettement supérieure à l'ancienne pour être adoptée, sur les plans techniques et économiques. Sinon l'ancienne est conservée et perfectionnée, n'imposant pas une prise de risques élevés, surtout un coût mal maîtrisé au départ.

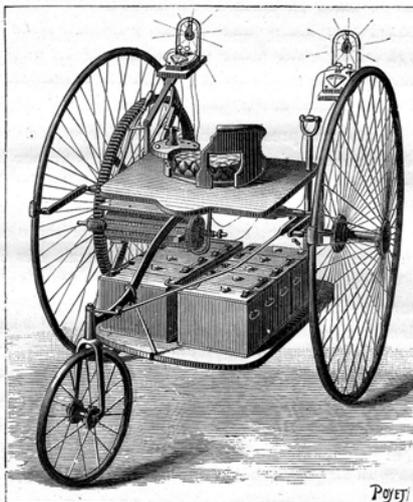
Et puis, la crainte du changement est un gène dominant de l'espèce humaine, y compris les techniciens, surtout âgés, au sommet d'une belle carrière (6).

### L'auto-mobile

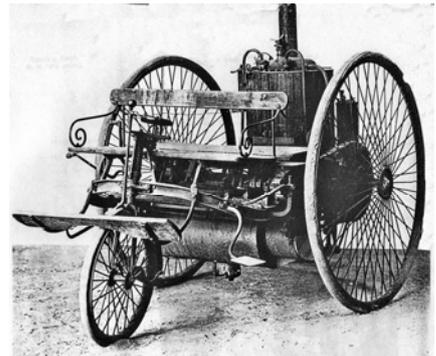
Comme pour la locomotion sur voie ferrée, la vapeur précéda l'électricité pour tracter des véhicules autonomes, auto-mobiles, c'est à dire transportant leur propre énergie.

Pour mémoire, citons ce tricycle à vapeur conçu par René Thury à Genève, avant d'être l'un des promoteurs de l'électricité en Suisse (zd), ou cette calèche d'Amédée Bollée père (ze). Il construisit ensuite en plusieurs exemplaires un petit autobus, *l'obéissante* (zf), comportant plusieurs éléments mécaniques des futures autos à pétrole que construisit ensuite son fils. L'autobus à huit places fit le trajet Paris - Le Mans en 18 heures en 1876, suivi d'un Paris-Orléans.

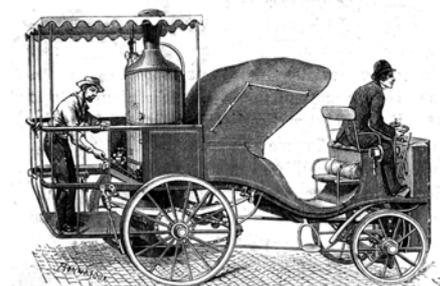
Pour un véhicule routier, le poids était un handicap sérieux, surtout s'ajoutait au poids de la machine, celui du charbon et de l'eau qu'il fallait renouveler tous les 30 à 50 km. Pourtant les calèches urbaines à vapeur eurent un certain succès, surtout en Amérique dans les décennies 1870 et 80. L'exposition de Paris fut un véritable déclencheur, l'on cherchait à utiliser cette nouvelle électricité pour toute sorte de choses, et la locomotion était un besoin ancestral prioritaire. Elle était capable d'entraîner un véhicule avec un moteur pratique depuis la fin des années 1880, et pouvait se stocker dans les accumulateurs de Planté depuis 1860, améliorés par Faure en 1881.



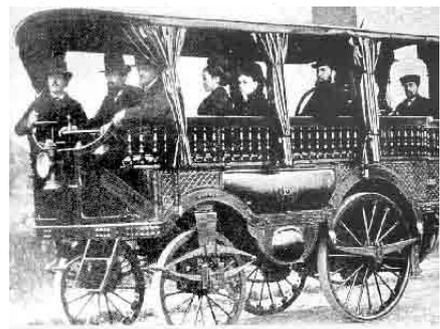
zg Tricycle Ayrton 1881



zd Tricycle à vapeur Thury - 1876



ze Calèche à Vapeur Bollée

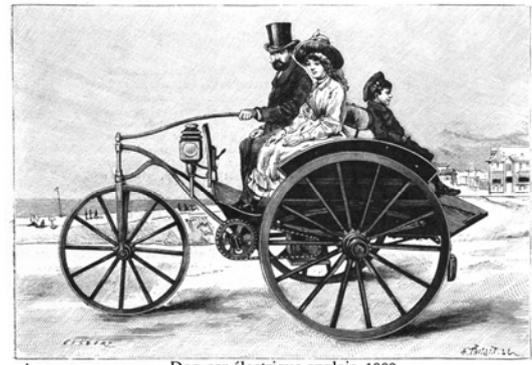


zf L'obéissante à vapeur d'Amédée Bollée - 1876

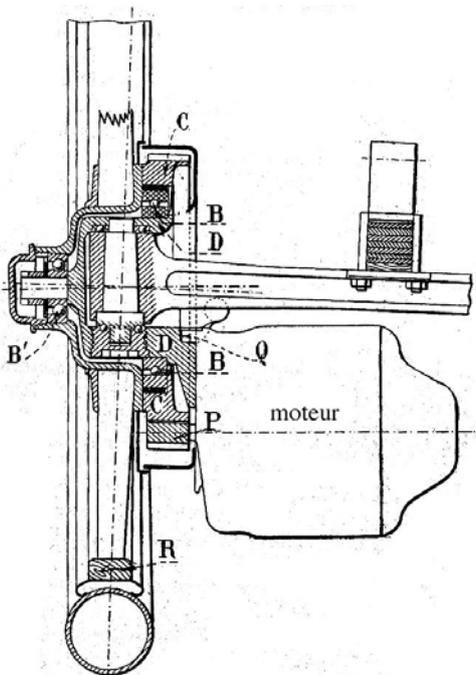
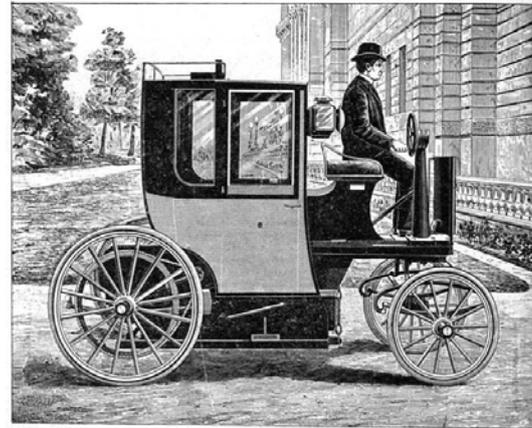
L'un des premiers véhicule électrique n'était qu'un tricycle, fabriqué par cet inventeur fécond, Gustave Trouvé, qui avait « trouvé » (comme le précisait son sigle, *Eureka*) un petit moteur efficace (IV-1). Avec 3 éléments Planté et ses 160 kg, il roulait en mars 1881, avant l'exposition, à 12 km/h dans la rue de Valois à Paris. L'image de l'évènement n'ayant pas été gravée, il devait ressembler à celui de l'Anglais Ayrton (zg) propulsé avec 10 éléments.

Au début, les premières "accu-mobiles" n'étaient que de simples adaptations des différents types de voitures à cheval, comme l'illustre ce *dog car* (zh) ou ce fiacre (zj) vers 1890. Le développement rapide de la voiture électrique fut aussi le laboratoire de mise au point des différents éléments des futures automobiles, indépendamment du moteur de traction. Il fallut inventer le volant de direction agissant simultanément sur les deux roues avant, au moyen de "fusées" indépendantes, puis un système de freinage, des roues cerclées de bandages caoutchouc en attendant le pneumatique gonflé d'air, le tout sur un châssis ou le bois fut rapidement remplacé par l'acier ou la fonte. Le réservoir d'énergie, les accumulateurs, ne posait pas de problème étant relié par fils au système de commande, si ce n'était son poids important, environ 500 kg pour un total de 1500 kg.

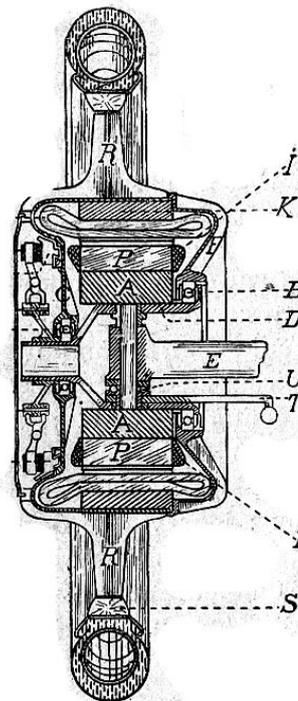
Le moteur, unique ou double, entraînait l'essieu arrière d'abord par chaîne, puis engrenages, et ensuite directement les roues arrière dans un modèle de Krieger (zk), ou même intégré dans la roue avant chez Porsche (zl), ce qui en faisait la première traction-avant, sans avoir besoin des délicates transmissions homocinétiques par cardan des « *Traction avant* » de Citroën en 1934.



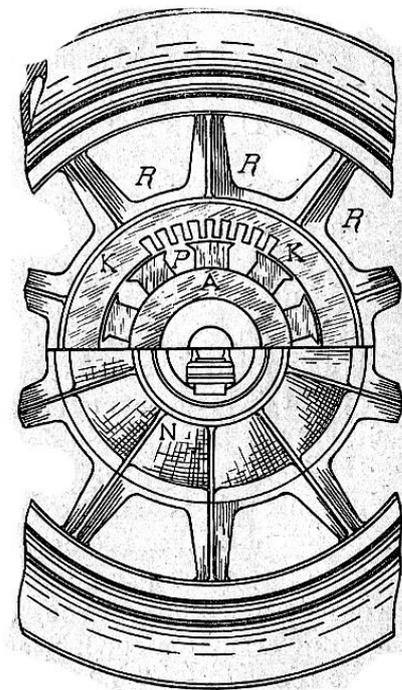
zh Dog-car électrique anglais -1888



zk Roue Krieger



zl roue motrice Porsche



Plus souples et simples qu'une boîte de vitesse mécanique, on imagina des combinateurs électriques jouant sur la mise en série ou en parallèle de demi-éléments de batterie, sur l'alimentation série ou shunt du ou des moteurs. On obtenait 6 à 8 vitesses, en plus du démarrage progressif sur résistance.

Deux moteurs disposés chacun sur une roue avant apparut une solution intéressante, pouvant être ainsi couplés par le combinateur. Le freinage mécanique par patins frottant sur des roues en fonte

pouvait être doublé par un freinage électrique sur résistance ou par récupération, les moteurs devenant alors générateurs.

La puissance du moteur était de 3 à 10 à ch, permettant de rouler en palier entre 20 et 30 km/h. Entre 1880 et 1898 leur rendement augmentait de 60% à 85% et leur poids diminuait de 30 kg par kW de puissance à 20 kg. L'autonomie était de 40 à 60 km, avec parfois possibilités d'échange des accus déchargés, plutôt qu'une recharge longue. Elle s'accrut sensiblement, les constructeurs d'accumulateurs ayant amélioré leur fabrication. En 1881 les accus Faure accumulaient une énergie de 7 Wh par kg, en 1897 les accus Fulmen atteignaient 25 Wh par kg.

La dernière décennie du siècle, 1890, fut celle du "décollage" de la voiture électrique dans tous les pays, elle s'imposa rapidement sur la traction par chevaux, plus lentement sur la vapeur.

L'automobile Club de France, à peine créé, organisait en 1893 une démonstration dans Paris de 12 *voitures de place*, des taxis qui parcouraient 9 itinéraires de 60 km. Toutes étaient électriques sauf l'une des premières autos à pétrole, un coupé Peugeot, pas très au point et qui subit quelques pannes. L'auto électrique s'affirmait comme futur moyen de déplacement urbain. Ce que Hospitalier, électricien averti, confirmait un peu trop vite dans *La Nature* : *Désormais il est acquis que le fiacre à moteur à essence de pétrole ne saurait constituer un système d'exploitation de voitures publiques dans une grande ville. C'était avec un bon siècle d'avance.*



zn Auto-électrique postale - Paris 1894



zm Station de charge des taxis Krieger - 1895

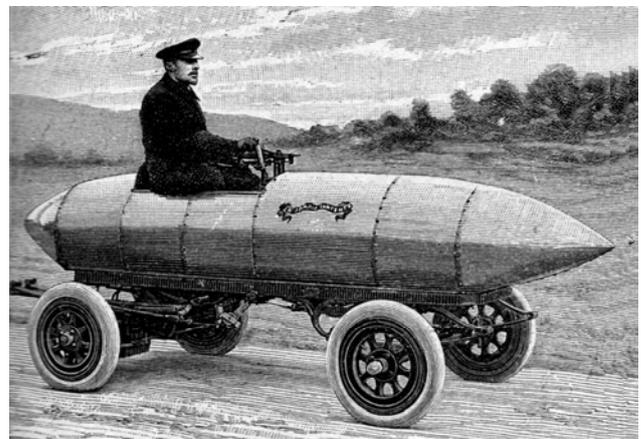
Plusieurs milliers de véhicules furent construits par des dizaines de constructeurs en France : Jeantaud, Krieger, Cie française des voitures électromobiles, Milde, Electrolux. En Belgique Pieper, Jenatzy. En Autriche Daimler, Porsche. En Allemagne Mercedes.

Les postes de recharge des accus s'organisaient, tel celui des taxis Krieger (zm). Parfois on échangeait seulement les batteries déchargées contre d'autres chargées.

Des flottes de voitures de livraison se constituaient (zn). Si les accus limitaient la distance à parcourir, la souplesse du moteur électrique permettait une grande vitesse, mais pas très longtemps. C'est le constructeur belge, Camille Jenatzy, qui pilota sa *Jamais contente* jusqu'à 106 km/h en 1899 (zo).

### L'automobile à pétrole

L'électro-mobile rencontra progressivement une concurrente avec la voiture à carbure de pétrole ou essence. Ce carburant, d'abord système d'éclairage dans les années 1875 et 1880, là où n'arrivait pas



zo Voiture électrique Jenatzy - Jamais contente - 1899

encore l'électricité, devint un nouveau vecteur d'énergie, une alternative aux chevaux dans la ville, mais esquissait une concurrence, timide au début, pour le chemin de fer, le transport sur longues distances.

Succédant aux premiers moteurs à gaz de ville Lenoir et Otto, le moteur à essence présentait des avantages certains pour la locomotion autonome, le principal étant de stocker facilement dans un réservoir une quantité d'énergie bien plus élevée que celle des lourds accumulateurs. Il avait quelques inconvénients, son bruit gênant en ville qui lui a donné au début celui de moteur tonnant, ses pannes fréquentes du mélange délicat air-vapeur d'essence, la carburation, ou de l'allumage de ce mélange, soit encore du démarrage laborieux à la manivelle (7). S'y ajoutait la nécessité de changer la vitesse transmise aux roues au moins deux ou trois fois, plus une marche arrière au moyen d'une boîte de vitesse longue à perfectionner, puis à rendre automatique. Le système nécessitait alors un embrayage à friction.

Ces inconvénients se sont résolus au fil des années, avec souvent des moyens électriques. L'allumage de l'étincelle détonante au bon moment était un problème.

Plusieurs systèmes furent essayés. La source d'électricité pouvait être la magnéto (à aimants permanents) basse tension, puis à haute tension, puis les piles ou accus non rechargés, envoyant la haute tension directement aux bougies ou par un trembleur à came, ou un rupteur du primaire d'une bobine d'induction. Il était difficile de régler l'avance à l'allumage variable. Subsistèrent les deux systèmes actuels (avant l'électronique), la magnéto haute tension pour les moteurs de faible puissance sans accumulateurs. Pour les autres, quand les accumulateurs rechargés par le véhicule apparurent, ce fut le rupteur synchronisé avec bobine d'induction.

Cet accumulateur rechargé par une dynamo en permanence s'est imposé lorsque le démarreur électrique se répandit dans les années 1920, il permit par surcroît l'éclairage électrique remplaçant les phares à pétrole ou à acétylène, ainsi que des essais d'embrayage électromagnétique.

La technique de la voiture à essence, d'une certaine complexité mécanique fut plus longue que l'électrique pour parvenir à un niveau satisfaisant. Aussi les deux techniques cohabitèrent près de vingt ans, sans que l'une domine l'autre.

Le grand handicap de l'électrique était toujours son réservoir limité d'énergie, les accus pesaient 500 kg et stockait une dizaine de kWh. Pour l'essence, un réservoir de 25 l, pesait 30 kg et stockait plus de 100 kWh. Inéluctablement la première parcourait 50 km à 25 km/h, pendant que l'autre faisait 10 fois plus.

En conclusion, la voiture électrique remplissait la fonction de fiacre amélioré, réservé exclusivement à la ville, alors que celle à essence pouvait remplir cette fonction un peu moins bien, avec bruit, odeur, moins de souplesse de conduite, mais représentait surtout un nouveau moyen de transport. Elle allait permettre de se rendre à moyenne distance, 50 à 200 km, partout où n'allait pas le chemin de fer, bien mieux qu'avec une voiture à cheval, dans la mesure d'existence de routes adaptées.

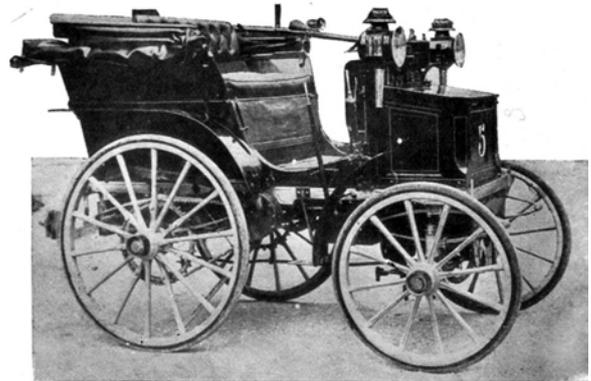
Un événement démontra que la voiture à pétrole ouvrait ce nouvel espace, les moyennes et longues distance sur lesquelles ses concurrentes à vapeur ou électrique étaient incapables de la supplanter. Le Comte de Dion créateur de la marque Dion-Bouton organisa en 1895 une course spectaculaire Paris-Bordeaux aller et retour, soit 1200 km sans étapes, si ce n'est pour ravitaillement et changement de chauffeur. Bien que cette épreuve fût destinée à démontrer les possibilités de l'auto à essence, sur les 22 participantes, 15 étant de ce type, 6 à vapeur, et courageusement un électromobile d'un constructeur réputé, Jeantaud.

Inutile de préciser qu'il ne fit pas le retour, malgré une vitesse de 25 km/h, contraint de changer ses 38 batteries de 12 kg tous les 50 ou 60 km.

Sur les 6 voitures à vapeur, une seule termina dernière. Des 15 voitures à essence, 8 ont terminé, dont l'une, Peugeot, était équipée de nouvelles roues à pneumatiques gonflables Michelin, mais avec des rechanges pour les nombreuses crevaisons.

La première arriva Porte Maillot après 48 h de route, c'était une Panhard-Levassor, début d'une marque célèbre par sa qualité jusqu'en 1965 (zp).

Cet exploit était plus exceptionnel qu'il ne paraît, car ce n'est pas sur 1200 km de routes qu'ont roulé les autos, mais des chemins de terre mal empierrés, suffisants pour les diligences, où mêmes nos voitures d'aujourd'hui n'oseraient pas dépasser 50 à l'heure. Il n'y a donc pas eu, pendant plus de dix ans encore, un grand engouement pour ces longs voyages inconfortables et dangereux, à 50 km/h maximum, avant l'aménagement et le goudronnage des routes, mais cette possibilité s'ouvrait.



zp Panhard et Levassor à essence, gagnante de la course Paris - Bordeaux - Paris de 1895

### La voiture pétroléo-électrique

Il arrive parfois dans l'histoire des techniques que deux procédés différents permettent d'obtenir un produit remplissant sensiblement les mêmes fonctions.

On n'arrive pas bien à choisir laquelle serait la meilleure et pour résoudre ce dilemme, des inventeurs combinent alors les deux techniques, essayant de prendre les avantages de chacune, si possible sans ses inconvénients.

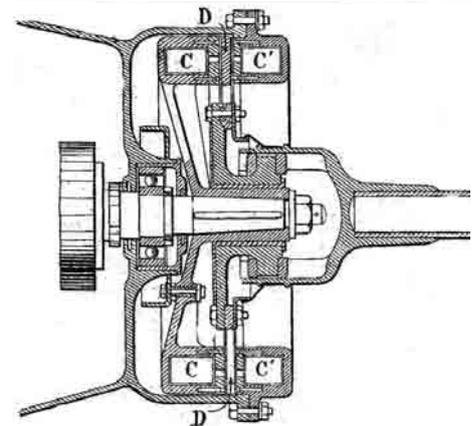
Peut-être Heilmann avec son étrange locomotive électrique-vapeur de 1892 avait inspiré les inventeurs. Ils ont remplacé la source principale d'énergie de la voiture électrique très pénalisante, les accus, par le pétrole d'un moteur thermique, la transmission du mouvement aux roues se faisant plus souples et simplement par des moyens électriques.

Trois catégories de système ont été développées sur ce principe avec chacun des variantes, témoignant de l'esprit créatif avancé de l'époque, résolvant les problèmes plutôt par des automatismes électriques que mécaniques. Leurs voitures étaient plus proches de nos voitures d'après 1980, confiant à l'électricité, pilotée par électronique, certaines fonctions qui auparavant étaient assurées par des mécanismes.

#### 1 – Les voitures mixtes

Mildé ajoutait simplement un petit groupe électrogène rechargeant en permanence la batterie. Dans le système Thury et celui de Dowsing le moteur thermique avait une puissance moyenne et la dynamo calée sur l'arbre de transmission fonctionnait soit en génératrice chargeant la batterie auxiliaire, soit en motrice alimentée par la batterie.

Le système **auto-mixte** de Pieper était le plus perfectionné. Une dynamo montée en volant sur l'arbre du moteur thermique est reliée à une batterie d'accus de puissance réduite et fonctionne tantôt en génératrice quand le couple résistant mécanique est faible, tantôt en motrice quand il est fort. Tous les équipements auxiliaires étaient électriques, l'allumage des bougies naturellement, le réglage du carburateur était électrique et automatique, un curieux système électrique assurait à la fois l'embrayage par aimantation de la couronne C et le freinage par la couronne C' (zq). Il y avait une pédale d'embrayage, une de frein, et un accélérateur à levier manuel. Le réglage de la vitesse se faisait par un combinateur électrique. Le démarrage était lui aussi électrique, sans nécessiter la pénible manivelle.



zq Embrayage et frein électrique de l'Auto-mixte- 1901

## 2 – Les voitures à **transmission électrique**.

La dynamo génératrice calée sur l'arbre moteur alimentait directement un ou deux moteurs entraînant les roues. Dans certains systèmes, ceux de Porsche et de Krieger, la génératrice travaillait à puissance constante automatique en fonction de la commande des gaz du moteur thermique. Sur la Porsche- Lohner, le moteur intégré dans la roue avant, comme sur le modèle tout électrique. (zl)

## 3 – Les voitures à **changement de vitesse électrique**

Le changement de vitesse mécanique à engrenages mobiles est resté longtemps le point faible des voitures à moteurs thermiques. L'électricité solutionnait le problème plus simplement et efficacement par des couplages de dynamos.

Les voitures pétroléo-électriques ou mixtes ont fonctionné plus d'une dizaine d'années en parallèle avec les électriques et les thermiques simples. Mais leurs avantages certains les rendaient plus chères. Elles disparurent comme les électriques vers 1914, mais renaîtront sous le nom d'hybrides vers 2000.

## Au xx<sup>e</sup> siècle

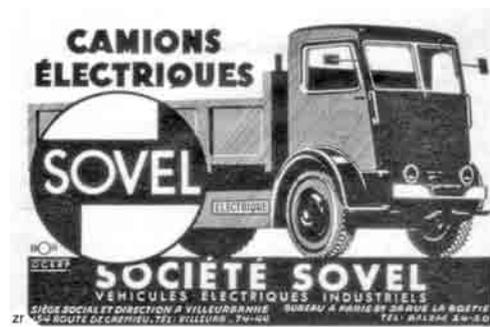
En 1900 ce fut l'apogée, 3000 voitures roulaient en France dont les 2/3 étaient électriques ou mixtes. Mais l'expérience du moteur thermique s'approfondissait, ses handicaps, la boîte de vitesse, le bruit, les pannes, se résolvait progressivement et le prix de la voiture, chère au début concurrençait maintenant l'électrique. Elle allait beaucoup plus loin en se ravitaillant dans les rares stations d'essence qui s'implantèrent sur les longs parcours. Plus difficile pour l'électrique qui avait besoin de plusieurs heures de charge dans des installations spéciales.

Les systèmes mixtes, hybrides peuvent apparaître comme une transition longue entre deux techniques ; la plus ancienne n'évoluant plus, la nouvelle se perfectionne, élimine ses défauts d'origine et finit par dominer seule, surtout si le facteur prix joue en sa faveur.

Le déclin de la voiture électrique s'amorça vers 1905. En Amérique, Ford qui débutait avait demandé à son ami Edison de lui fabriquer un accu plus performant, le nickel-fer, ce fut une déception. En 1908, il inventait le travail à la chaîne des *temps modernes*, et vendait 240 000 voitures à essence en 1914.

La capacité de la voiture à moteur thermique de parcourir de longues distances était peu exploitée par manque de routes *carrossables*, bien que les voitures à pneus y roulaient mieux que les carrosses. On commença à *goudronner* les routes avec un nouveau sous-produit provenant des raffineries de pétrole. Le pétrole se trouvait ainsi apporter à l'automobile son énergie et des routes « carrossables ».

Si le véhicule électrique disparut après WW1, il réapparut en 1925 sous forme de camions fabriqués à Lyon par *Sovel*, Sociétés des Véhicules Électriques.(zr) Bien adapté à un nouveau besoin, les bennes de ramassage d'ordures, le Sovel intéressa des entreprises comme camion de livraison urbain. Les fortes restrictions d'essence en France pendant WW2 rendirent incontournables les Sovel. Ils n'étaient pas seuls, *Vetra* construisait aussi à Paris camions puis trolleybus. Ces deux sociétés disparurent en 1960/70.



## Renaissance de la voiture électrique

En recherche-développement, avant d'envisager la reprise de travaux sur un sujet ou un produit abandonné depuis longtemps, il faut bien analyser les facteurs techniques et économiques qui l'ont fait abandonner et auraient évolué depuis. Sinon il vaut mieux s'arrêter et attendre leur évolution, ou encore adopter des solutions de transition si un changement favorable paraît en cours.

Depuis les années 1990, on redécouvre la voiture électrique, pour remplacer la voiture (à moteur) thermique.

Quels défauts reproche-t-on à la voiture thermique ?

– Une source d'énergie à épuisement proche (décennies) et donc à coût croissant à terme, polluante en CO<sub>2</sub>, et autres gaz gênant surtout en ville.

Quels avantages présentait la voiture électrique ?

Sa propulsion électrique lui donnait un net avantage, coût, souplesse, rendement, fiabilité, silence, mais abandonnée depuis des années, elle avait toujours le talon d'Achille fatal de son réservoir d'énergie, les accus au plomb ou nickel-cadmium, très insuffisants en énergie stockée, trop lourds et assez coûteux.

Deux solutions apparaissaient un siècle plus tard :

– L'une, la **pile à combustible**, avait progressé depuis la pile à gaz de 1839, par les recherches engagées, en France dans le cadre DGRST vers 1965, et beaucoup d'autres plus récentes. Elle ne paraît pas encore capable d'équiper des millions de voitures à prix acceptable et souffre de deux inconvénients qui pourraient être rédhibitoires : le catalyseur en platine, de coût et réserves limitées – l'hydrogène obtenu à partir, soit d'hydrocarbures rares à terme et dégageant du CO<sub>2</sub>, soit par électrolyse de l'eau dont le rendement électrique global avec celui de la pile serait limité à 25%. Ajoutons le craquage de l'eau dans des réacteurs nucléaires à 800°C, mais de génération IV.

En ajoutant la dangerosité de stockage et distribution, peu compatible avec le principe de précaution actuel. L'incendie du Hindenburg en 1937 et ses 36 morts signa la fin des dirigeables transatlantiques à hydrogène, en plein développement.

— L'autre, de nouveaux accumulateurs électrochimiques, recherchés depuis un siècle. Celui au **lithium** apparaît plus performant d'environ 3 à 4 fois en énergie par kg, mais son coût est élevé, près de la moitié de celui du véhicule, et les réserves mondiales exploitables seront-elles suffisantes ? On ne sait pas encore le recycler économiquement.

Des deux solutions, le réservoir d'énergie avec des accus au lithium paraît en 2010 mieux adapté, malgré son coût.

Entre ces incertitudes, aucun choix clair n'apparaît encore en 2010 ; il est probable que des solutions partielles coexisteront pendant des années, en attendant une évolution plus nette des paramètres :

– D'une part que l'essence se raréfie et son prix augmente d'abord vers 2 € le litre, ce qu'elle coûtait d'ailleurs en 1973, puis plus haut avec finalement vers 2050 des carburants synthétiques de remplacement, extraits du charbon ou du gaz.

– D'autre part que la solution lithium devienne opérationnelle, recharge assez rapide en particulier et que son coût diminue et sa durée de vie augmente

Les solutions temporaires et simultanées de transition pourraient être :

– La voiture électrique urbaine économique à accumulateur classique, plomb ou nickel-cadmium, ou mieux lithium à court kilométrage, 60 à 100 km, de préférence regroupée en flottes banalisées avec lieux de recharges collectives et gérées par la ville les entreprises et administrations.

– La voiture électrique privée, semi urbaine à accus lithium, capable de 150 à 200 km, plus chère, éventuellement à accus loués et se remplaçant facilement dans des stations services spécialisées, presque aussi vite qu'un plein de réservoir. Pour compenser un peu l'autonomie réduite, il faudra équiper de nombreuses stations-service avec des systèmes de recharge rapide, dans la mesure où les accumulateurs le supportent.

– La voiture hybride, onéreuse, tous usages, urbain et long parcours. Sa destinée étant une transition plus ou moins longue entre le thermique et l'électrique, l'inverse du rôle qu'ont joué les voitures mixtes de 1900. Mais ces dernières tendaient à compenser les inconvénients notables des premiers moteurs

thermiques, maintenant résolus. Actuellement, elles n'apportent qu'une économie assez partielle de carburant pour un prix plus élevé.

On constate d'ailleurs le phénomène déjà noté pour d'autres inventions, le procédé classique se défend contre le nouveau en s'améliorant : la voiture thermique réduit sa consommation par des progrès du moteur, ou bien un carburant 15 % plus énergétique, le fioul.

Ces solutions coexisteraient avec la voiture thermique actuelle dont l'usage dominant décroîtrait lentement avec le coût et la rareté du carburant, fabriqué à partir du charbon vers 2050 environ.

## Le transport par câble

Le câble de fil de fer puis d'acier, toronné comme les cordes de marine, a été utilisé pour tirer des charges ou des moyens de locomotion actionnés déjà par la vapeur.

Le *transport de la force* était un enjeu important au XIX<sup>E</sup>, que le câble a partiellement permis de résoudre très partiellement avant l'apparition de l'électricité (IV-2). Inversement, l'électricité a permis la généralisation d'autres transports par câble, personnes et marchandises.

### Le funiculaire

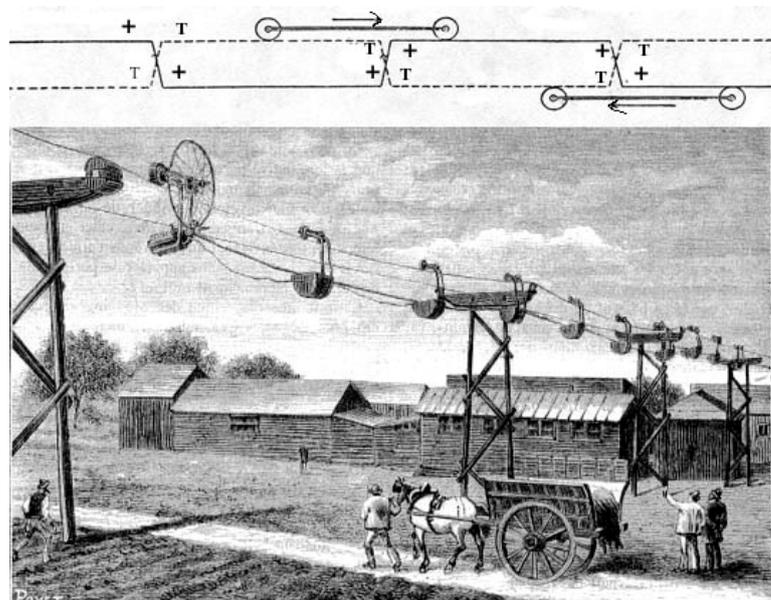
Son utilisation la plus simple a été le funiculaire tractant des petits chemins de fer sans locomotive, sur de fortes pentes. Il y avait deux voitures, reliées par le même câble en boucle guidé au sol et tournant au sommet sur une poulie motrice, actionnée elle-même par un moteur électrique à deux sens de marche.

Le système était bien adapté aux fortes pentes des régions montagneuses ou encore à Lyon pour accéder sur une colline voisine. Deux funiculaires, tractés par des machines fixes, d'abord à vapeur en 1862, puis électriques, transportent journallement des milliers de personnes et marchandises à la Croix Rousse et à Fourvière.

### Le telpherway ou téléphéage

Le professeur anglais Fleeming Jenkin expliquait en 1883 dans une conférence à l'université d'Edimbourg qu'il ne fallait pas transposer à l'électricité le système de locomotion imposé par la vapeur, une lourde locomotive traînant tout un train sur une voie nécessairement très solide et coûteuse. L'électricité permettrait d'après lui des moteurs de traction légers remorquant quelques wagonnets légers aussi, sur une voie simple et économique, n'occupant pas de terrain, un câble aérien suspendu à des poteaux.

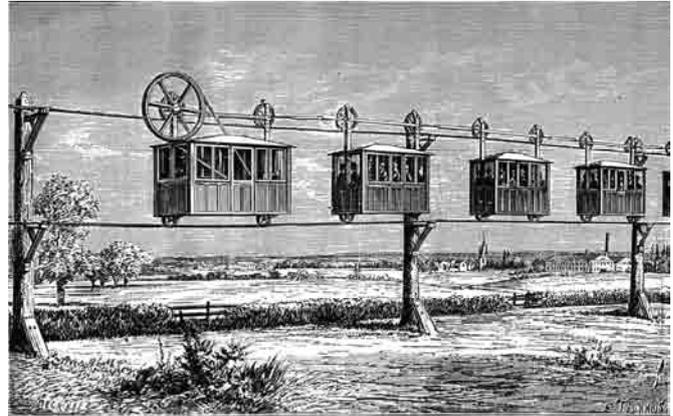
Un prototype fut réalisé par Ayrton et Perry, suite au décès du professeur, au village de Glynde Newhaven, pour transporter 25 t par jour d'argile à la Sussex Cement Co. Le problème de l'alimentation électrique du moteur était résolu par un système assez complexe, sans câble conducteur sur lequel frottait un trolley. (zs)



zs Telphéage électrique - système Ayrton et Perry - 1884

Les poteaux éloignés de 20 m portaient les deux câbles aller et retour, fixés aux poteaux et interrompus tous les 40 m. À chaque interruption, deux conducteurs électriques étaient connectés suivant le schéma, reliant chacun un tronçon de câble aller à un tronçon retour de la même polarité Terre ou +. Le train de bennes long de 40 m prenait le courant à chaque extrémité, le moteur et la dernière benne. A chaque interruption, le courant s'inversait, mais le moteur shunt continuait dans le même sens.

La ligne longue d'un mile était contrôlée par un opérateur à l'extrémité où était la génératrice. Ce type de transport électrique, fut repris en Amérique par Chandler, ingénieur de la *Suspension Transportation Co.* de Boston.(zt) Le système compliqué de l'alimentation électrique de Jenkin était remplacé par deux câbles. Le principal servait de suspension aux wagonnets et de conducteur d'alimentation ; un autre sur lequel roulaient aussi ces wagonnets, pour éviter les balancements, constituait le conducteur de retour à la génératrice. La légère locomotive de tête tirait les wagonnets, soit pour transport de voyageurs, soit de matériaux.

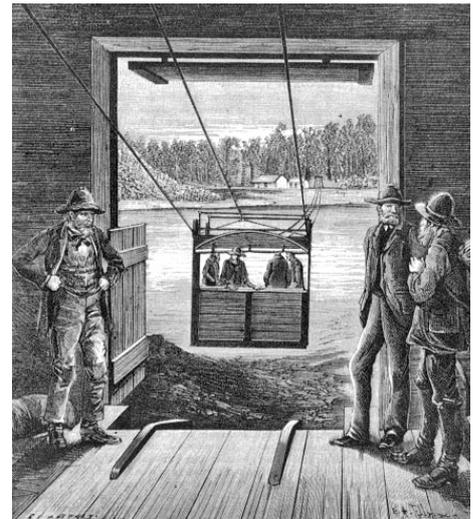


zt

Téléphérique électrique à voyageurs - 1886

L'idée primitive de constituer des petits trains suspendus autonomes était la reproduction en aérien du chemin de fer terrestre. Elle fut remplacée par un système américain figurant le principe du téléphérique actuel pour traverser une rivière (zu). Deux câbles porteurs sur lesquels roule une seule benne suspendue et reliée au câble tracteur, entraîné lui-même par la machinerie située à l'extrémité supérieure.

Ce téléphérique fut perfectionné par les Italiens pour ravitailler leurs forts militaires des Alpes avant 1914. C'est l'entreprise Ceretti et Tanfani qui installa un premier grand téléphérique touristique à Chamonix à partir de 1910, en service en 1920, destiné à monter les alpinistes au sommet de l'Aiguille du Midi. Les travaux furent perturbés par les deux guerres et il n'arriva jamais au sommet, seuls les deux premiers tronçons furent terminés et abandonnés après 1950. Un autre tracé audacieux fut alors adopté, sans pylône intermédiaire pour le tronçon supérieur.



zu

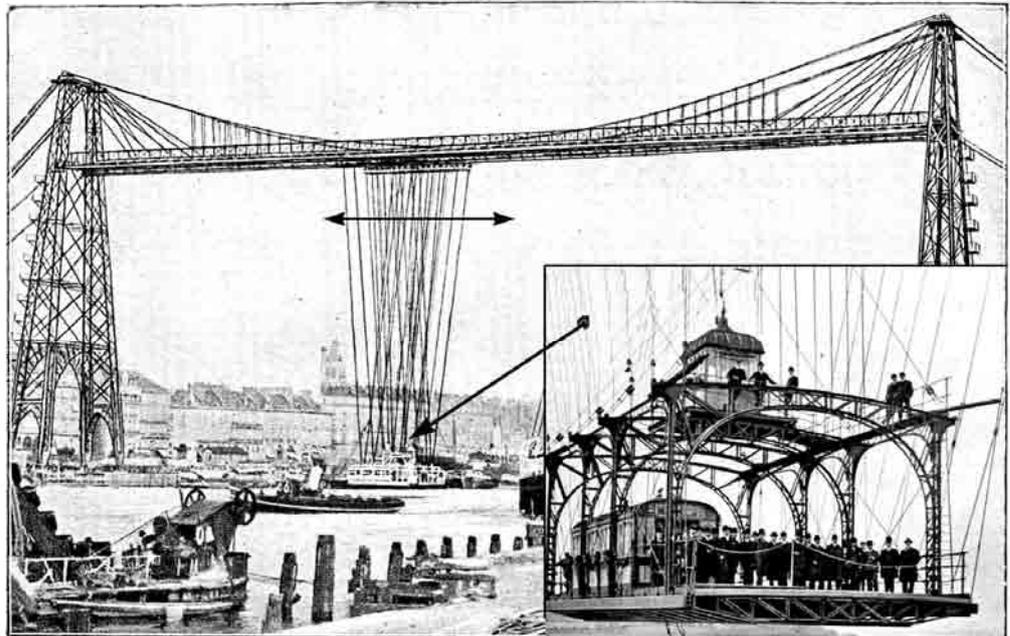
Téléphérique américain

### Téléski, télésiège et télécabines

Le téléphérique, dont on connaît le succès après WW2 pour le tourisme en montagne, a inspiré ces systèmes plus simples pour la pratique du ski. Ils sont décrits dans l'ouvrage historique récent, *L'aventure du transport par câble*, par l'un des premiers constructeurs, Pierre Montaz, (8). Ces systèmes commencent à être exploités comme transports urbains dans divers pays, mais pas encore à Grenoble, ville embouteillée qui les a fait naître pour le ski.

### Le pont transbordeur

Ce système se développa au début du XX<sup>e</sup> siècle. Il permettait aux véhicules et personnes de traverser le bras de mer situé à l'entrée des grands ports de commerce (zv). Un pont n'était guère possible en raison de la hauteur des mats et cheminées des grands navires qui devaient passer dessous. Grâce aux câbles d'acier et à l'électricité, le



zv Pont transbordeur de Rouen, suspendu au dessus de l'eau -1908

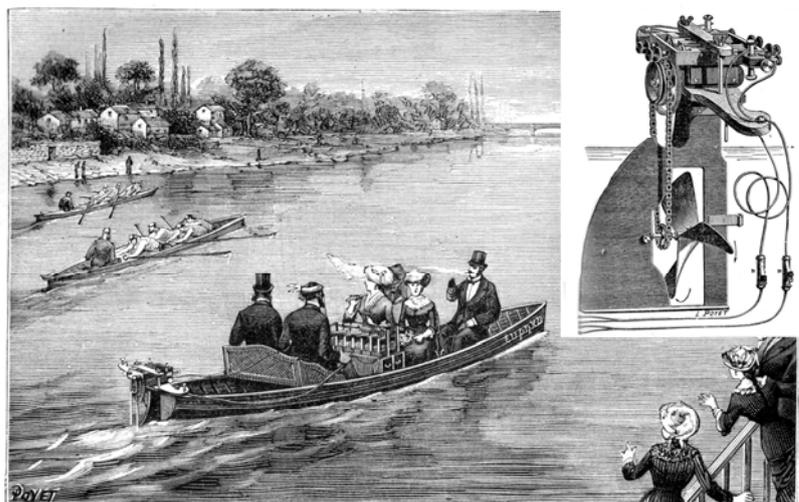
problème pouvait être résolu. Sur chaque rive était édifiée une haute tour métallique ; les sommets des deux tours étaient reliés par des câbles suspendus sur lesquels circulait une sorte de chariot roulant sur les câbles tractés par câbles depuis la machinerie électrique sur une berge. Une série de câbles y étaient attachés, servant à suspendre une vaste nacelle, où prenaient place voitures et piétons traversant le bras de mer en quelques minutes, sans gêner le passage des navires.

La plupart des ports européens ont construit un pont transbordeur, sauf Londres qui avait déjà son célèbre *Tower Bridge*. Ils furent remplacés par des tunnels, plus rapides pour les autos.

### La navigation électrique

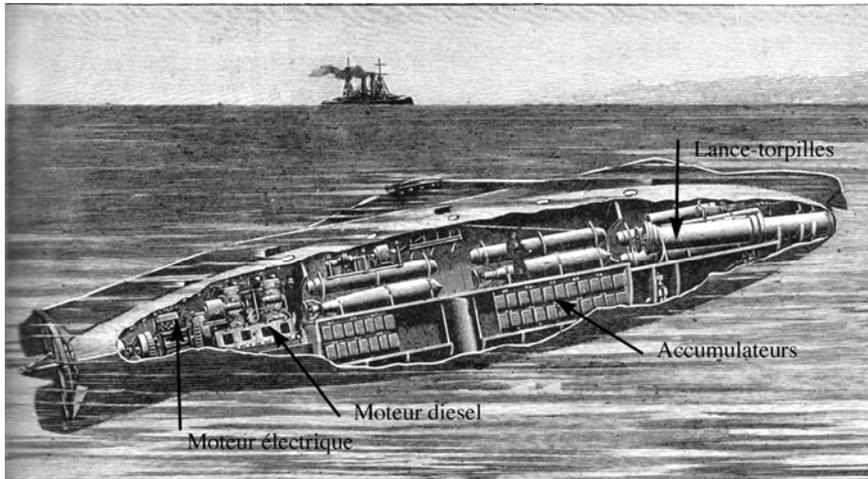
Hermann von Jacobi avait déjà fait naviguer, avec le meilleur des moteurs électriques de l'époque, un petit canot sur la Néva en 1838 (IV-1).

Pour démontrer que la vapeur n'était pas la seule énergie de propulsion des navires, un autre inventeur de moteurs, Gustave Trouvé avait présenté à l'exposition de 1881 un petit canot électrique dans un bassin. La même année, il faisait sur la Seine une démonstration de navigation électrique. Son moteur-gouvernail performant peut être considéré comme le premier moteur hors-bord électrique. (zw)



zw Le bateau électrique euréka de G Trouvé, sur la Seine 1881

Ces tentatives n'eurent pas beaucoup de suite, se heurtant à l'incontournable fatalité frappant tout véhicule autonome électrique, de ne pouvoir embarquer qu'une faible quantité d'énergie pour son moteur.



zx

Sous-marin Holland - 1904

Pourtant, une catégorie de navires est restée, jusqu'à une époque récente, impérativement propulsés par l'électricité en plongée, les sous-marins, contraints d'embarquer l'énergie nécessaire pour la plongée dans des accumulateurs volumineux qui occupent la moitié de l'espace (zx). Ils sont rechargés en surface à partir du moteur diesel de propulsion normal. L'énergie nucléaire à l'aide de la vapeur les a libéré de

cette difficile contrainte. Ils restent des semaines immergés.

Si l'électricité ne peut assurer directement la propulsion des navires, en raison de son stockage très insuffisant, la propulsion finale des arbres d'hélices par des moteurs électriques a bien des avantages sur les systèmes mécaniques puissants : régulation plus simple de l'effort moteur, de la vitesse de rotation et de l'inversion de marche avant - arrière. Dans ce cas, l'énergie mécanique produite par de puissants moteurs thermiques, turbines à vapeur ou diesels tournant à vitesse constante, entraîne des générateurs électriques alimentant les moteurs de propulsion.

Le plus grand et rapide paquebot à son époque, le *Normandie*, (1935-1942) innovait avec ses 4 groupes turbopropulseurs de chacun 40 000 ch, dont les alternateurs produisaient du triphasé 5 kV pour les 4 moteurs synchrones attelés aux arbres d'hélices. À la vitesse maximale de 32 nœuds, il consommait 1 t de gasoil au km. La propulsion électrique est souvent adoptée aujourd'hui pour les navires puissants, dont le dernier grand paquebot Queen Mary 2, et bénéficie d'une régulation beaucoup plus souple avec des semi-conducteurs de puissance.

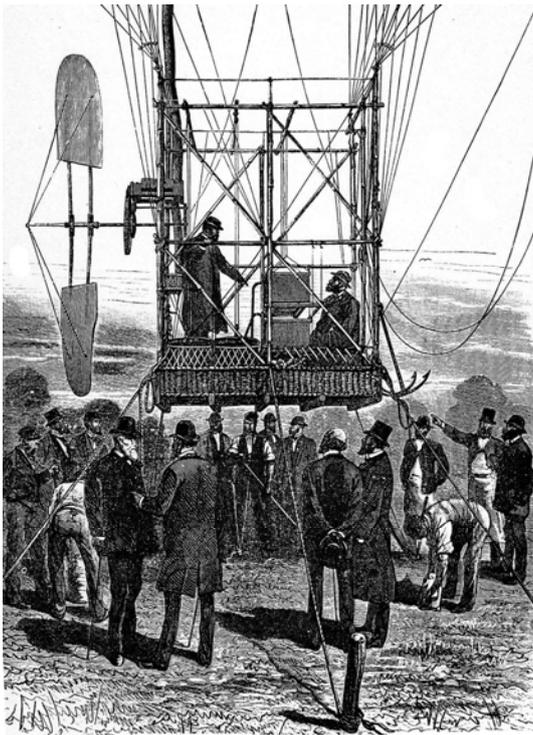
Dans la navigation, l'électricité s'est révélée depuis quelques décennies seules adaptées à entraîner l'hélice des propulseurs d'étrave. Ces propulseurs, intégrés dans l'étrave, sont perpendiculaires à l'axe du navire pour l'aider à pivoter. Ils sont devenus presque indispensables, sur la plupart des grands navires, pour manœuvrer dans l'étroitesse des ports sans faire appel aux remorqueurs.

### La locomotion aérienne

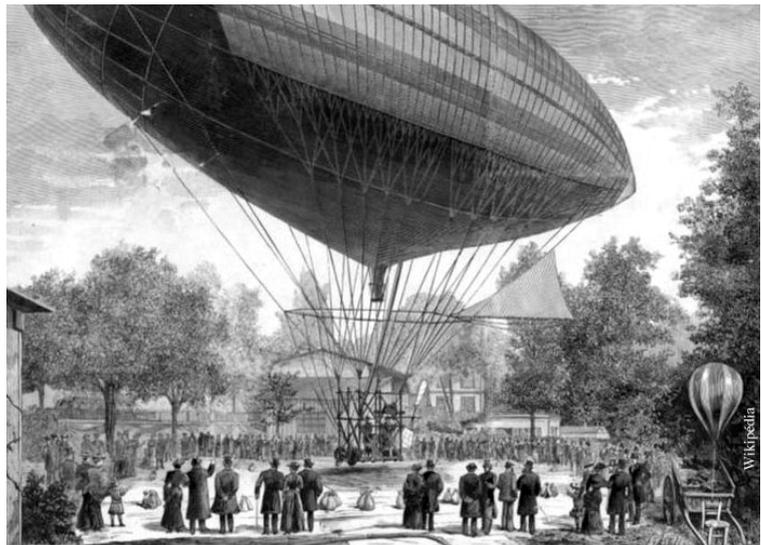
Depuis la montgolfière de 1782, les hommes rêvaient de naviguer dans l'air. Henri Giffard équipa un premier aérostat avec un petit moteur à vapeur de 3 ch qui lui permit de parcourir par temps calme 27 km à 10 kmh.

Gaston Tissandier avait présenté à l'exposition de 1881 un aérostat miniature propulsé à l'électricité. Son modèle en grandeur réelle de 28 m fit 2 démonstrations en 1883. Les 24 piles au bichromate donnaient 8 ch sur l'arbre moteur, portant l'hélice à 2 pales en tissu. Avec 2 personnes à bord, il atteignait 10 kmh, nettement insuffisant pour remonter même un léger vent (zy1) (zy2).

L'année suivante, les deux capitaines Renard et Krebs améliorèrent un peu la performance. Après un parcours de 20 km, ils ont atterri au point de départ à 100 m près. Le *Moniteur* de 8/1884 concluait : *Après un pareil succès, on peut dire sans aucune exagération, que le problème si longtemps cherché est enfin résolu. La route de l'air est ouverte.*



zy2 Nacelle et moteur du dirigeable Tissandier - 1883



zy1 Aérostat dirigeable électrique de A. et G. Tissandier

Il faut cependant préciser que l'électricité y a été vite remplacée par le moteur à essence. Le poids en navigation aérienne est une tare sévère.

En effet, en parallèle avec le plus lourd que l'air, l'avion, se sont développés au début du XX<sup>e</sup> siècle les grands dirigeables, plus légers que l'air, gonflés à

l'hydrogène. Ces *zeppelins* étaient conçus par une société allemande. Ils traversaient l'Atlantique en vols commerciaux de 50 heures avec des dizaines de personnes. Ils étaient propulsés par des moteurs à essence. Ils sont intervenus dans la guerre WW1.

En mai 1937, le Hindenburg, géant de l'air de 230 m s'enflammait à l'atterrissage faisant 36 morts sur 117 passagers. Cette catastrophe signa la fin des dirigeables à hydrogène. Ne restent que l'hélium plus cher et l'air chaud, peu efficace.

Une solution échapperait à ce handicap, en produisant l'électricité à bord de l'avion avec l'énergie solaire. Des prototypes d'avions à panneaux photovoltaïques ont été réalisés, (II-2), mais les défauts de ce mode de production, l'intermittence et la très faible puissance limiteront toujours le procédé à de très rares cas particuliers.

Par contre, il est probable que les avions sans pilotes, connus depuis WW1, développés par l'armée américaine depuis quelques années, les *drones*, se développent pour des applications civiles. Ils sont propulsés par des réacteurs d'avions à kérosène, mais pour de très faibles charges embarquées de quelques kg et une autonomie d'une heure ou moins des batteries d'accus suffisent pour alimenter un moteur électrique de propulsion.

À la fin de ce chapitre sur la propulsion par l'énergie électrique des moyens de locomotion, **la conclusion est claire** : l'électricité apporte bien le meilleur moteur pour entraîner tout moyen de transport, mais s'il est autonome, il est victime de son handicap, la bien trop faible capacité de stockage de son seul réservoir d'énergie, l'accumulateur.

Une solution seulement mixte a été adoptée dans plusieurs cas : moteur thermique couplé sur une génératrice électrique et souplesse de la transmission par moteurs électriques. Innovée ponctuellement par la locomotive Heilmann, elle est toujours utilisée dans les chemins de fer au diesel, dans la navigation et dans l'automobile hybride.

## Compléments

**1 - L'apparition de la roue**, chez les Sumériens il y a 4,5 millénaires, probablement aussi en Chine, accompagnait celle du chariot. Ensuite pour remplacer la traction humaine, il devint pratique d'appivoiser un animal, généralement le cheval. On remarquera que des innovations majeures tel le chariot sur roues, tiré par le cheval, comme celle du fer, nécessaire à la fois pour cercler la roue et constituer l'essieu, ont provoqué le **basculement total ou disparition de civilisations**. Nous savons ainsi que le Moyen Empire égyptien sombra pendant deux siècles après l'invasion des Hyksos, ou Hittites d'Asie mineure, ils possédaient le char à roues tiré par le cheval et le fer pour les roues et les armes. Les Egyptiens n'avaient que la force humaine et des outils de bronze et de silex, avec lesquels ils ont pourtant édifié les pyramides. Au XV<sup>e</sup> siècle, les civilisations Aztèques, Mayas et Incas ont disparu devant les chevaux, chariots à roues, les épées et fusils en fer des Espagnols. Hollywood nous a montré comment les Indiens tiraient à bras leurs charges, avec un traîneau-brancard, sans roues.

La comparaison se retrouve avec notre **civilisation scientifique et industrielle**, dans laquelle le monde a basculé depuis deux siècles. Elle résulte de l'invention de ce moteur à vapeur qui a multiplié par cent, puis mille et plus, l'énergie que nous fournissait le cheval et les énergies naturelles. L'électricité est intervenue pour faciliter et amplifier cette révolution énergétique à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Nous saurons avant la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, avec la grande pénurie énergétique inéluctable, conjuguée et amplifiée par une dramatique surpopulation incontrôlée, comment cette civilisation s'adaptera ou disparaîtra, comme le veut la grande loi biologique, depuis trois cents siècles pour homo sapiens et 3,5 giga-années pour la vie.

**2 – Des rails en pierre**, ou plutôt des rigoles taillées dans la pierre pour guider les roues des chars ont précédé le rail en fer, nécessitant des centres sidérurgiques puissants. On retrouve ces rigoles à Pompéi ainsi que sur certains tronçons de voies étroites, surplombant des pentes dangereuses. L'un de ces passages alpins, surplombant un ancien lac, est connu sur la route de Grenoble au col du Lautaret au lieu dit Rochetaillée, précisément.

**3 – HENRI MARÉCHAL – *Les tramways électriques* – ed. Baudry Paris, Liège 1897**

**4 – Le trolleybus a de sérieux avantages sur le tramway :**

– Le plus important est le coût d'investissement de la voie presque nul ; seulement réserver une partie de la chaussée existante en voie propre. La voie du tram impose un bouleversement du s/sol, déplacement de la plupart des canalisations enterrées, eau, égouts, électricité, gaz dont le coût est de 10 à 15 M€ par km, hors réaménagement des avenues. Le coût des voitures est plus élevé avec le tram.

– Ce coût très élevé de la voirie incite, pour le tram, à établir conjointement les voies d'aller et retour, d'où nécessité d'avenues larges, alors que le trolley peut avantageusement emprunter des rues plus étroites dans un seul sens, le retour se faisant dans une autre rue, d'où une desserte partielle, mais du double d'habitants et moindre impact sur la surface des chaussées. L'expérience de Grenoble a montré que la rentabilité du tram nécessitait qu'un tram à double voie doive transporter 35 à 40 000 personnes/jour par km de voie. D'où obligation de densifier les immeubles le long des voies, développant un urbanisme concentrationnaire.

– Le tram transportant plus de voyageurs que le trolley est le transport adapté aux quelques axes à grand débit d'une ville. Le trolley pour les liaisons radiales à moyen et faible débit pour remplacer les lignes de bus polluantes à diesel ou gaz.

– Surtout, compte tenu de son coût, le trajet des lignes de tram est établi pour 50 ans ou plus, alors que la ville et ses banlieues évoluent. La modification d'une ligne de trolley se résume à déplacer les conducteurs aériens sur pylônes.

– Le tram transmet bruit et vibrations gênants aux habitations riveraines, malgré un amortissement coûteux des rails.

– Dans les courbes à faible rayon, le tram qui n'a pas de différentiel subit une forte usure des roues et rails, à changer périodiquement, malgré un ralentissement imposé au conducteur pour réduire aussi le grincement.

– Certains trolleys étaient équipés d'un petit moteur thermique leur permettant de rouler dans des sections non équipées de conducteurs aériens, ou en cas de panne de courant, sans embouteiller la ville. Le tram est esclave de sa voie ferrée.

– Les inconvénients du trolley sont réduits : pas de longs trains de plusieurs voitures, seulement deux articulées - installation d'un deuxième fil de trolley difficile avec des conducteurs souterrains – effort de traction sur pneus, du même tonnage, supérieur à l'effort sur rail, donc consommation électrique un peu plus élevée.

– Le confort et l'accessibilité des deux systèmes peuvent être équivalents (accès, suspension, accélération- freinage).

Lors de la redécouverte du tramway urbain, vers les années 1990, dans les premières villes françaises de Grenoble puis Nantes, circulaient encore des trolleys d'ancien modèle. De fortes pressions commerciales d'un constructeur ferroviaire ont fait éliminer d'emblée la solution trolley modernisé, alors qu'il n'y avait plus en France de constructeur de tram et disparition récente d'un constructeur de trolleys et camions. La loi de l'optimum technico-économique n'a pas joué par absence théorique de concurrence. C'est regrettable pour les raisons évoquées. Dans le classique conflit rail ou route, le rail a gagné. L'esprit moutonnier qui règne souvent chez les décideurs et élus n'incite pas à corriger cet engouement inconsidéré pour le tram. Ils le regretteront lorsque leur ville évoluera après 20 ou 30 ans. Changer le parcours du tram sera un bien plus gros chantier que simplement changer des fils de trolleys. Le trolley c'est la flexibilité d'adaptation à l'évolution de la ville avec un faible investissement.

**5 – Le réseau de chemin de fer français** était réparti depuis 1883 entre 6 compagnies : Nord – Est – Paris Lyon Marseille, PLM – Midi – Paris Orléans, PO – Ouest Etat.

Le PO et Midi fusionnèrent en 1934. En 1938 eut lieu la première nationalisation, regroupant toutes les compagnies au sein de la SNCF.

**6 - La crainte du changement** se manifeste dans les entreprises industrielles par une opposition masquée d'une partie du personnel aux nouveaux produits issus de la R et D. Ils remettent souvent en question les méthodes et habitudes de fabrication, gestion et vente, élaborée dans l'entreprise au fil des années pour ses produits traditionnels. L'enthousiasme des directions pour l'innovation est alors discrètement freiné par la résistance au changement des exécutants, souvent les plus âgés.

**7 - La panne** a été dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle le tribut normal de tout conducteur d'auto à essence. Il était rare qu'une voiture parcoure plus de 1000 km sans panne, pour 70% la motorisation et les freins, 20% les pneus. Il y avait peu de garages le long des routes et l'on y remorquait la voiture en panne souvent avec des chevaux. Le conducteur devait avoir des notions de mécanique, une boîte à outils, quelques pièces de rechanges et des manuels tels que : *Bibliothèque du chauffeur, Éléments de mécanique et d'Électricité 1907 - Les pannes en automobile, leurs méfaits, leur remède, ce que doit contenir le coffre d'une voiture automobile 1906.*

Seuls les gens aisés pouvaient acheter une auto et pour la conduire louaient un *chauffeur*, (nom du conducteur des premiers véhicules à vapeur) sachant mettre les mains dans le cambouis pour dépanner.

Encore aux années 1960, la voiture était vendue avec une boîte à outils. La manivelle de secours pour le démarrage ne disparut que dans les années 1970, suivie par la roue de secours. Il n'y a plus de clous perdus sur les autoroutes.

**8 –MONTAZ PIERRE, L'aventure du transport par câble, fondation–facim.fr**

## FIN du Tome IV

### **Bibliographie**

A la fin de chaque chapitre figure dans les Compléments une bibliographie, webographie concernant ce chapitre

La bibliographie générale pour l'ensemble du livre figure en fin du tome V

### **Reproduction**

Elle est libre pour toute utilisation non commerciale, à but culturel ou didactique, en indiquant l'origine : A. Ducluzaux –Électricité

### **Errata**

Ces livres, contenant des milliers d'informations, recueillies dans plus d'une centaine de documents divers, il en résulte statistiquement quelques erreurs malgré une vérification des sources. Le lecteur est donc remercié de signaler les erreurs de fait ou d'interprétation qu'il aura noté, avec leurs sources accessibles.

Les remarques et apports personnels sont souhaités :

[contact@electricite-decouvreur-inventeurs.com](mailto:contact@electricite-decouvreur-inventeurs.com)

**Si le lecteur souhaite poursuivre son exploration dans la genèse des autres domaines du monde électrique, il peut choisir parmi les 4 autres tomes, dont les sommaires ci-contre.**

Il peut consulter auparavant des extraits de chaque partie sur le site web :

**ÉLECTRICITÉ – DÉCOUVREURS – INVENTEURS**

[electricite-decouvreur-inventeurs.com](http://electricite-decouvreur-inventeurs.com)

# Les 5 tomes



Tome III - Et la lumière fut - Electrochimie



Tome II - Générer l'électricité



Tome V - Vecteur d'information



Tome IV - Vecteur d'énergie



# L'électricité

## Découvreurs et Inventeurs

Sommaires

### Tomes

#### I – Défricheurs de l'inconnu

Au lecteur

- 1- L'électricité, essai de définition
- 2- Magnétisme et électricité statique. Des chinois à Coulomb
- 3- L'électricité dynamique, la pile- Galvani, Volta – 1800
- 4- Découverte de l'électromagnétisme - Oersted, Ampère –1820
- 5- Découverte de l'Induction – Arago, Faraday – 1831
- 6- Lois et théories

#### II – Générer l'électricité

- 1- Générateurs électrochimiques, pile, accu, stockage
- 2- Générateurs statiques thermo/photo/piezo-électriques
- 3- Générateurs électromécaniques à induction
- 4- Bobine d'induction, Page, Ruhmkorff
- 5- Quelles énergies pour produire l'électricité – 1880-2011
- 6- Historique de la production d'électricité en France

#### III – Et la lumière fut – L'électrochimie

- 1- Lampe à arc
- 2- Lampe à incandescence
- 3- Lampe à décharge
- 4- L'exposition internationale d'électricité à Paris - 1881
- 5- Développements et réseaux d'éclairage électrique
- 6- Electrochimie –Électrometallurgie

#### 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

#### Biblio-webographie



*La fée électricité, an 2000.*

