

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



Albert Robida -1885

esclave ou fée ?

Sommaire – tome IV

Vecteur d'énergie

EXTRAITS

1- Le moteur électrique

L'électro-aimant. Pistes de recherches. Tentatives avec l'électro-aimant. Echecs. Moteurs en anneau. Moteurs/ générateurs. Petits moteurs.

2 – Transport de la Force par l'électricité

Expériences Deprez continu à haute tension : Munich, Gare du Nord, Grenoble, Creil. Expérience Fontaine de machines en série. Applications. Gaulard redécouvre l'alternatif avec le transformateur à Londres et Turin. Applications. 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.

3 – L'alternatif, nouveau vecteur d'énergie.

Domaines réservés au continu. Comprendre et calculer en alternatif. L'alternateur. Le transformateur. Le moteur synchrone. Moteur asynchrone polyphasé. Alternomoteurs monophasés. Générateur asynchrone. Autres moteurs en alternatif. Transformer l'alternatif en continu. Les très hautes fréquences.

4 – Centrales et transport

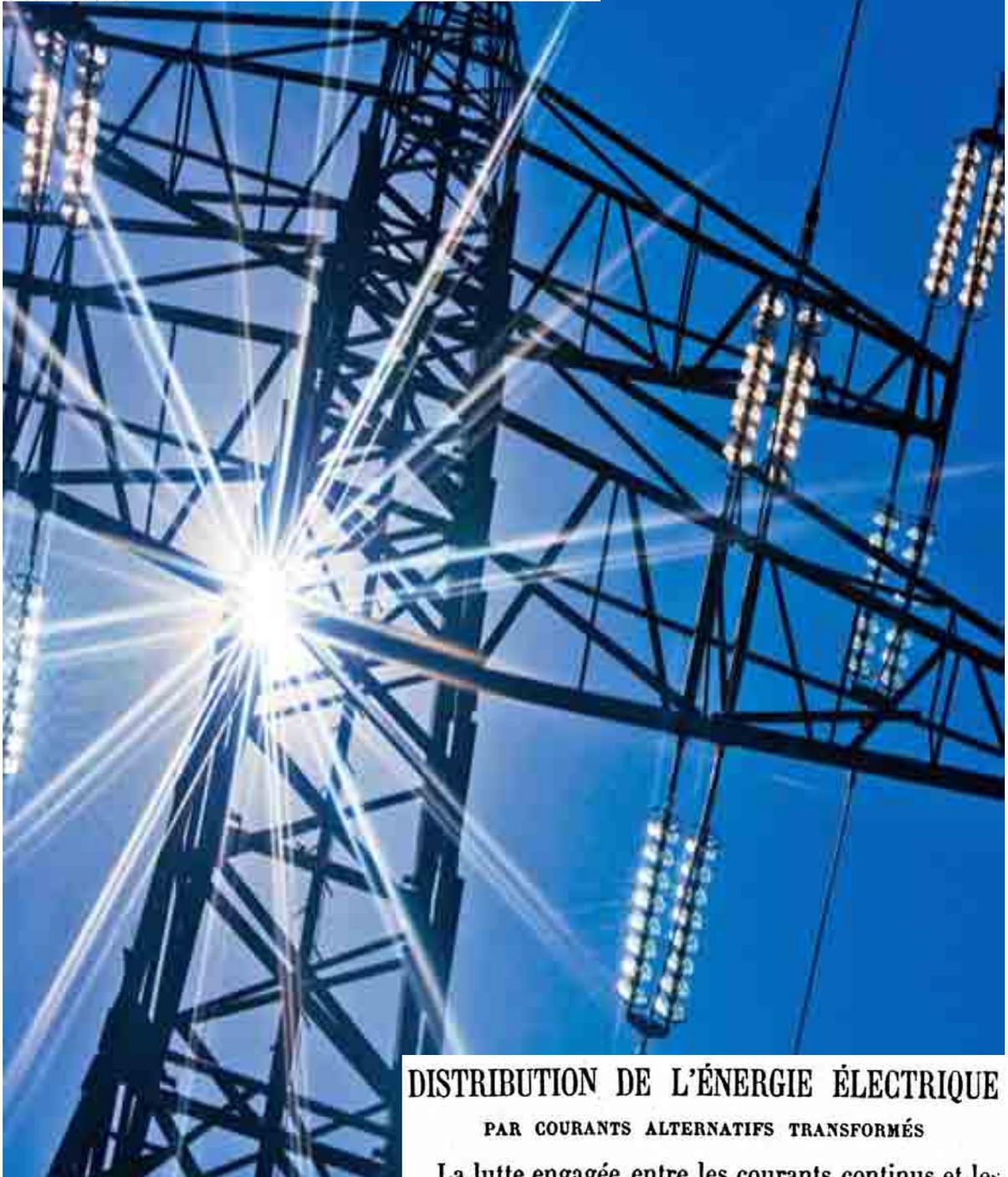
La puissante centrale du Niagara. Centrales et réseaux en alternatif polyphasé. Transport en continu à haute tension : système Thury, redresseurs à mercure, à thyristors. Applications CCHT.

5 - Locomotion électrique

A l'origine, la vapeur. Le tramway électrique : moteur, alimentation, trolleybus. Chemin de fer électrique, alimentation, développement lent. La grande vitesse. L'électromobile. L'auto pétroléo-électrique . Renaissance au xx^e siècle. Navigation électrique. Locomotion aérienne.

Quelques unes des 170 pages.....

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		15 000 V
continu		alternatif
		triphase

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

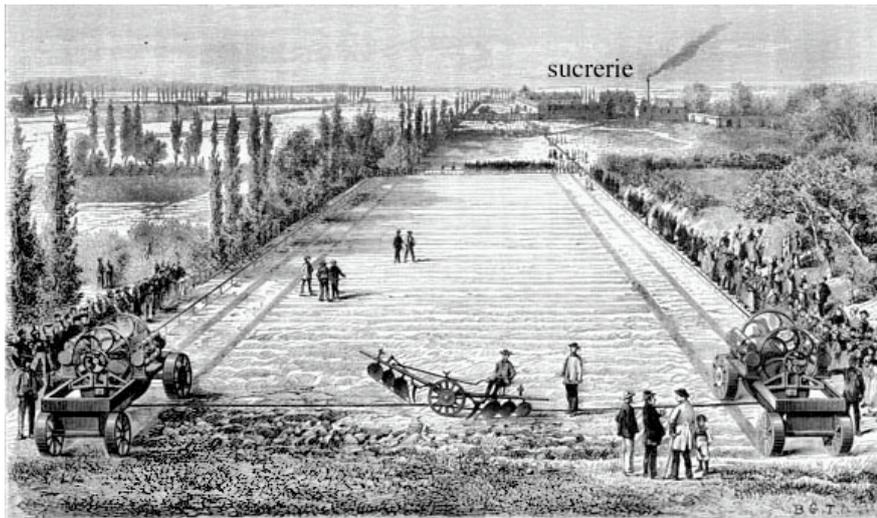
Au cours de l'année 1879, avant l'exposition de Paris, des physiciens de renom ont envisagé ou réalisé à petite échelle ce transport de force électrique :

- 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.

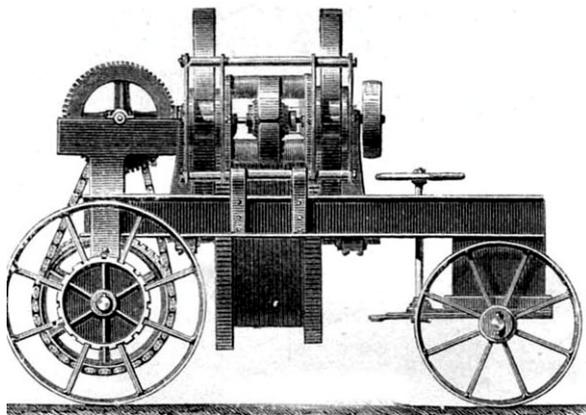
- en août 1879, le professeur W. Edward Ayrton faisait à Sheffield des conférences à 4000 ouvriers dans le cadre des cours du soir, expliquant comment on pourrait transporter la force par l'électricité. Dans une vingtaine d'années, elle serait générée avec le charbon depuis les mines, ou à partir des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

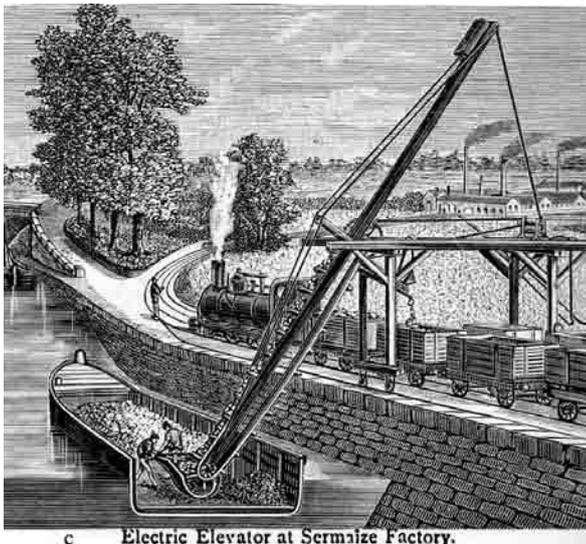
- en Allemagne, à l'exposition de Berlin, Siemens transportait des voyageurs sur 300 m avec un embryon de tramway électrique. Début prometteur.



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 mm², long de 400 ou 620 m suivant le champ à labourer. Avec un conducteur de 10 mm², 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.

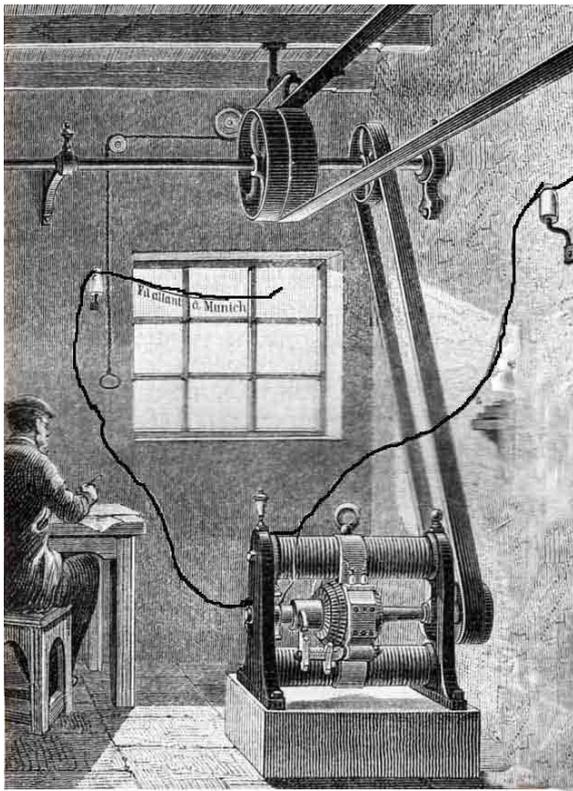
Expériences de Marcel Deprez, en courant continu à haute tension

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.

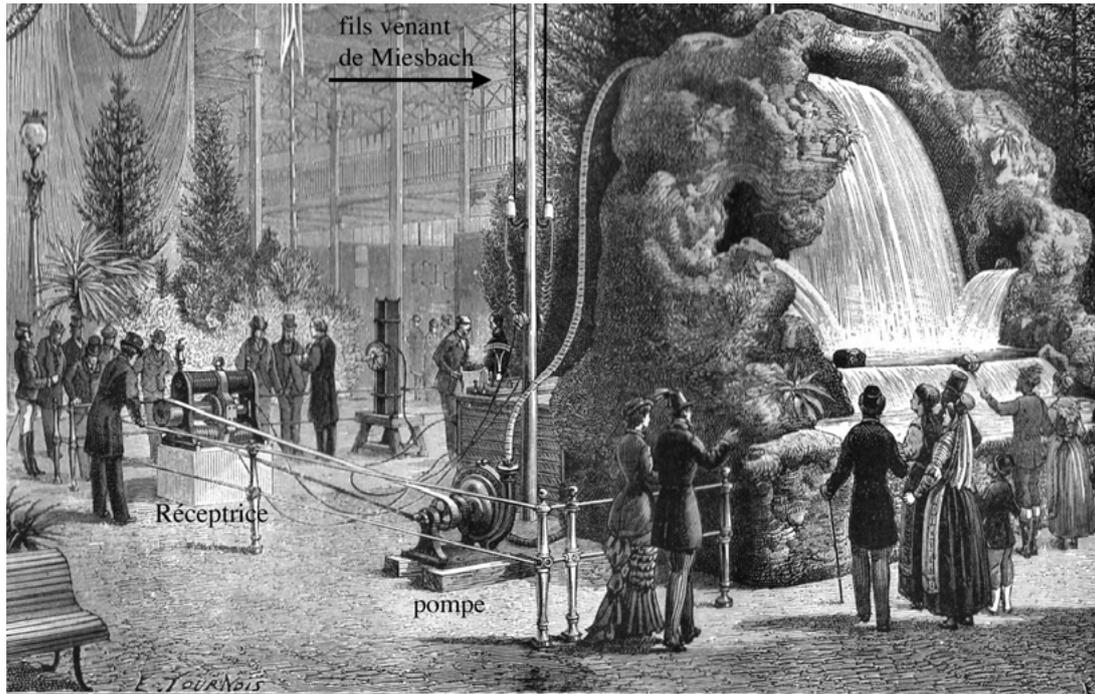
Deprez fit lui deux installations, l'une interne, un marteau-pilon électrique qu'il avait présenté à Paris, était manoeuvré par une génératrice disposée à côté (5). La deuxième relevait vraiment de la *great attraction* et devait confirmer ses calculs et annonces qui avaient beaucoup surpris, un transport 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 mm², 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.

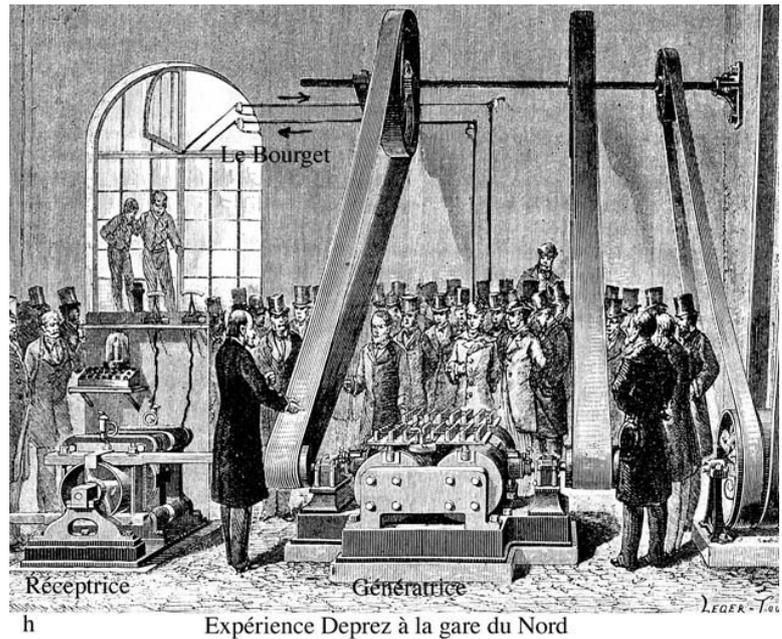
Un progrès important était accompli. Deprez et ses bailleurs de fonds songeaient maintenant à monter en puissance, mais une autre opportunité se présenta.

Expérience de Grenoble – août à octobre 1883

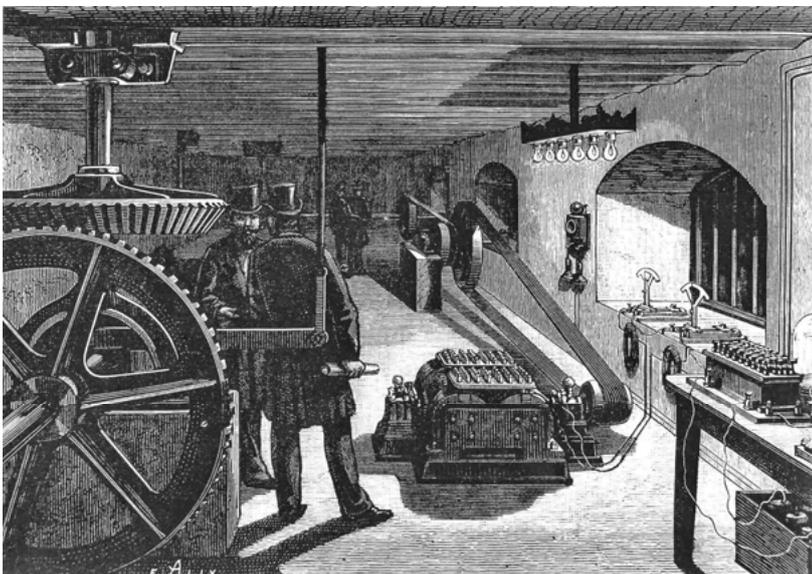
La ville de Grenoble et ses ateliers exploitaient l'énergie de l'anthracite des mines voisines de La Mure, bien qu'entourés de montagnes, riches en torrents et chutes d'eau. Souhaitant amener cette énergie hydraulique en ville, la municipalité avait demandé à l'un des membres du Conseil municipal, Aristide 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.

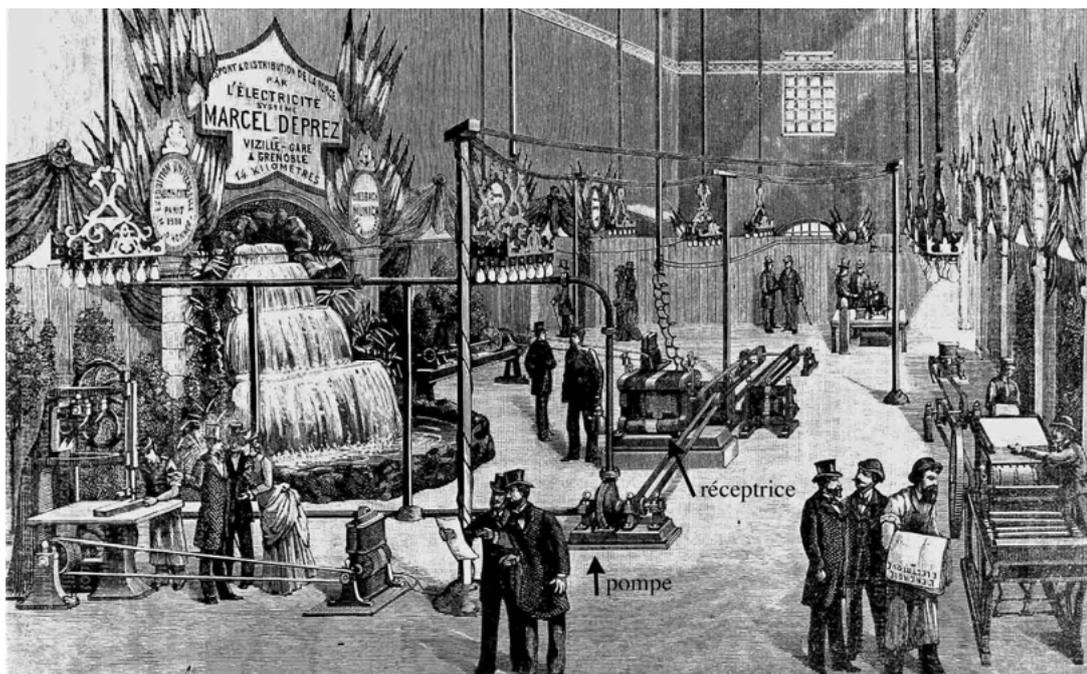
Le maire Edouard Rey envoya son adjoint le Docteur Bordier rencontrer Deprez à Paris.



h Expérience Deprez à la gare du Nord



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.

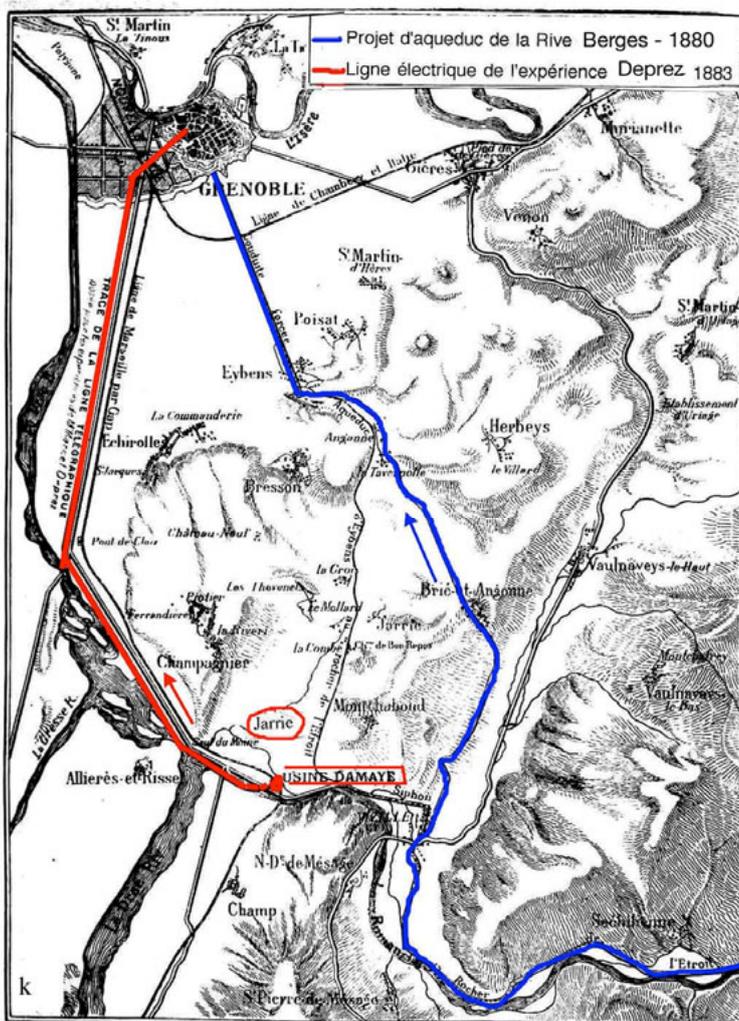
Le 2 août, le Docteur Bordier, animateur de l'expérience, fait une conférence sur le transport de la force par l'électricité devant une salle bondée.

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 :

Pages 33 à 68 non reproduites

Suite .../.....

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

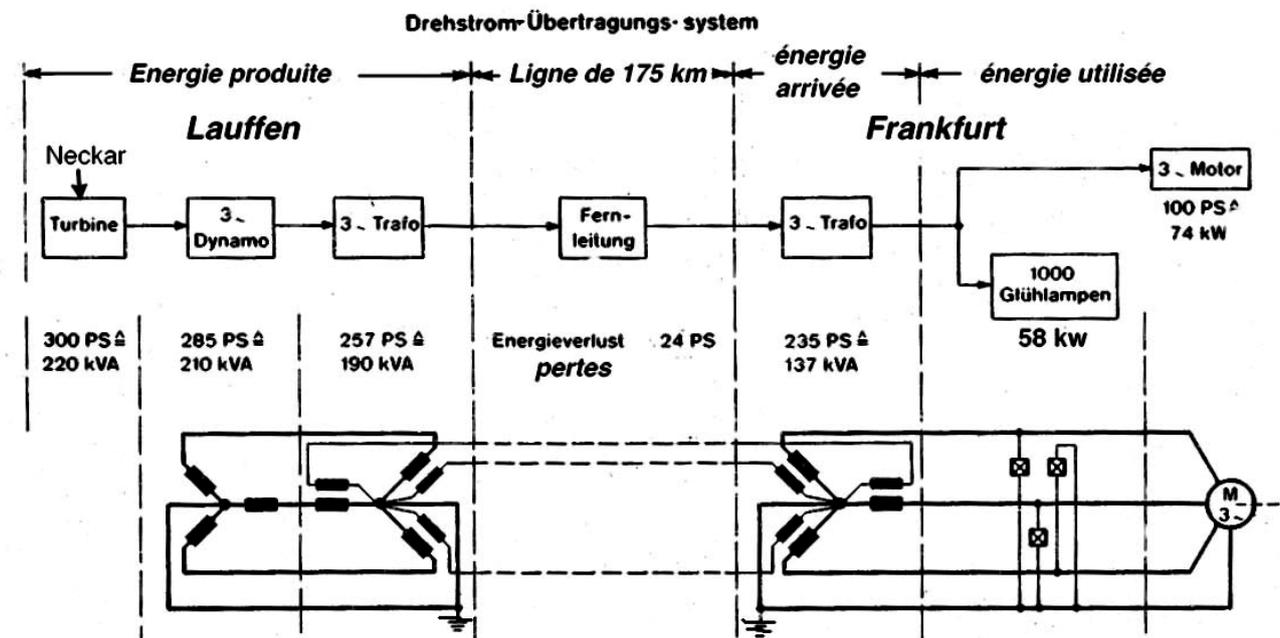
– À la fin de l'exposition, en septembre, la Société internationale des électriciens sera invitée à se réunir en Congrès.

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.

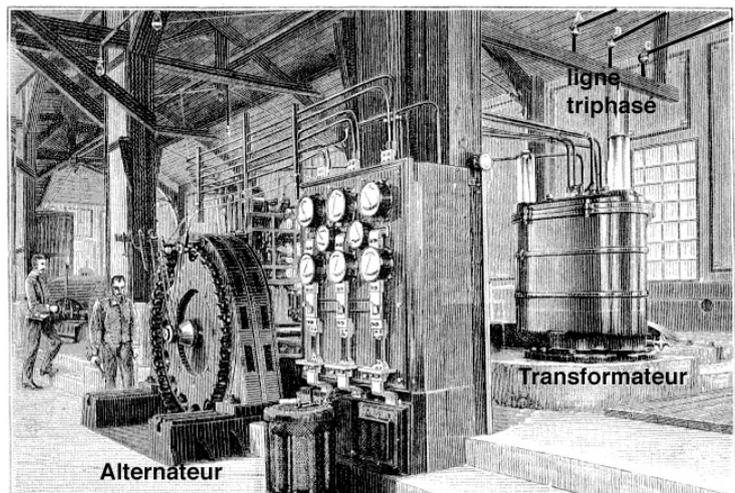
Son rendement atteignait 96 %. L'excitation était fournie par une petite dynamo de 1200 W. Pour réparation, c'était le stator induit que l'on faisait glisser pour dégager l'inducteur.

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.

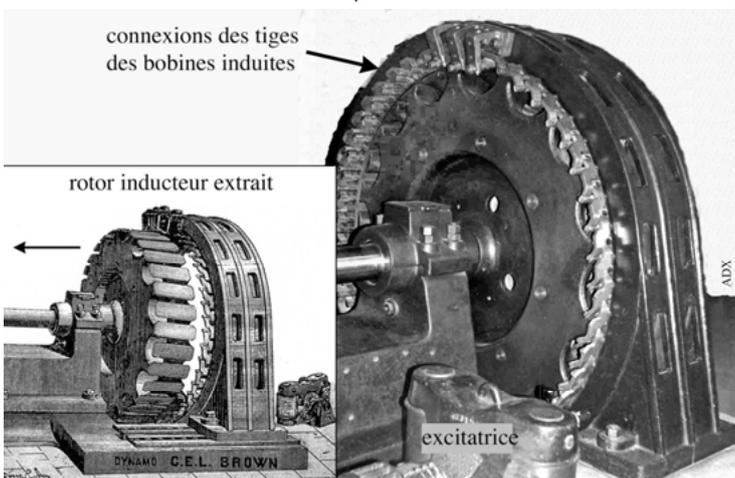
Les trois fils de phase haute tension, sortant du transformateur, montaient au-dessus du bâtiment et leur raccordement à la ligne aérienne se faisait après avoir traversé des coupe-circuits, fils fusibles en cuivre de faible section, longs de 2 m. Si le courant dépassait trop sa valeur normale, ils fondaient 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).



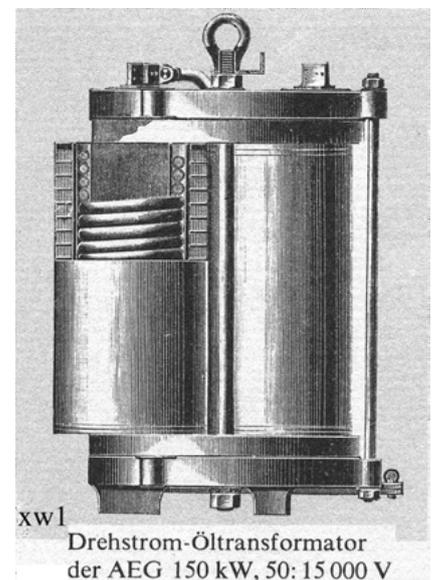
xv1

usine électrique de Lauffen



xv2

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

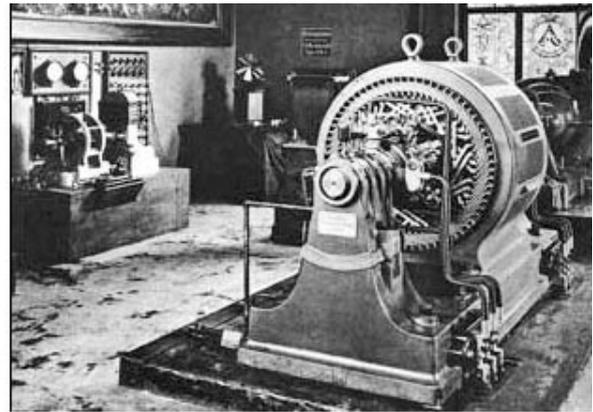


xw1

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



xw3 chute d'eau à l'exposition de Francfort

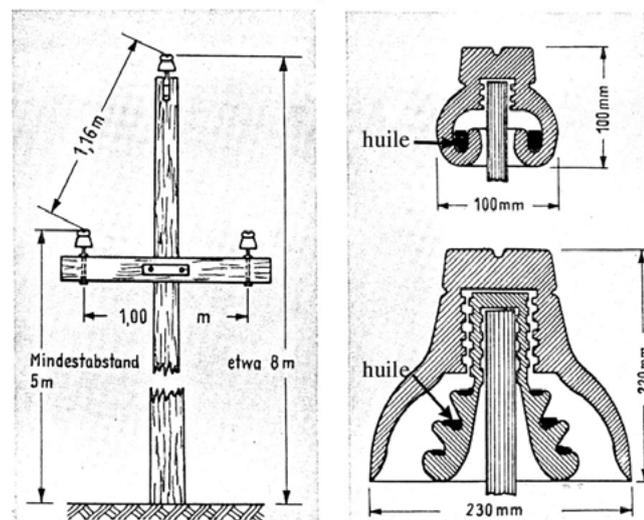


xw2 Francfort - moteur asynchrone AEG 100 PS

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.

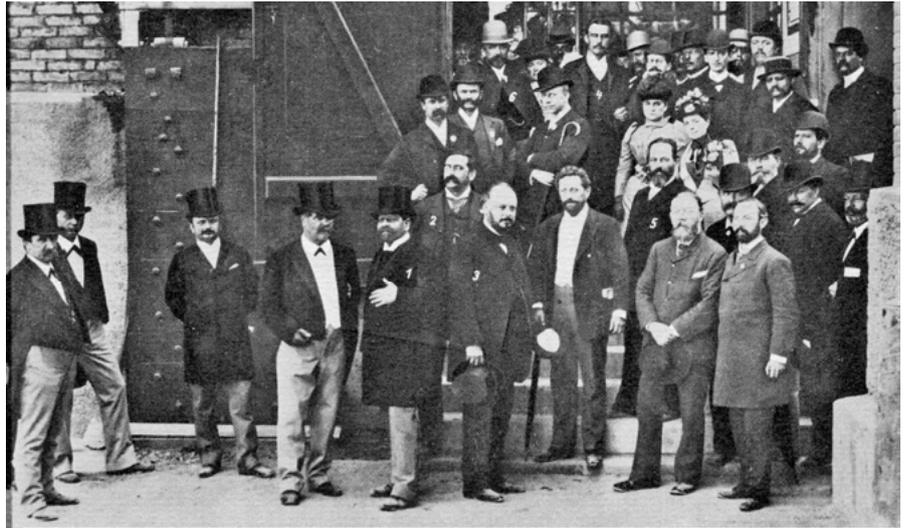
Dans son N° 12 du 6/2/ 1891, l'*Elektrotechnische Zeitschrift*, ETZ publiait une lettre de A. Schneller dont les calculs prouvaient qu'avec les pertes aux isolateurs, sur les 300 PS générés à Lauffen, seulement 37 PS arriveraient à Francfort. *La Lumière électrique*, dont l'allergie au courant alternatif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

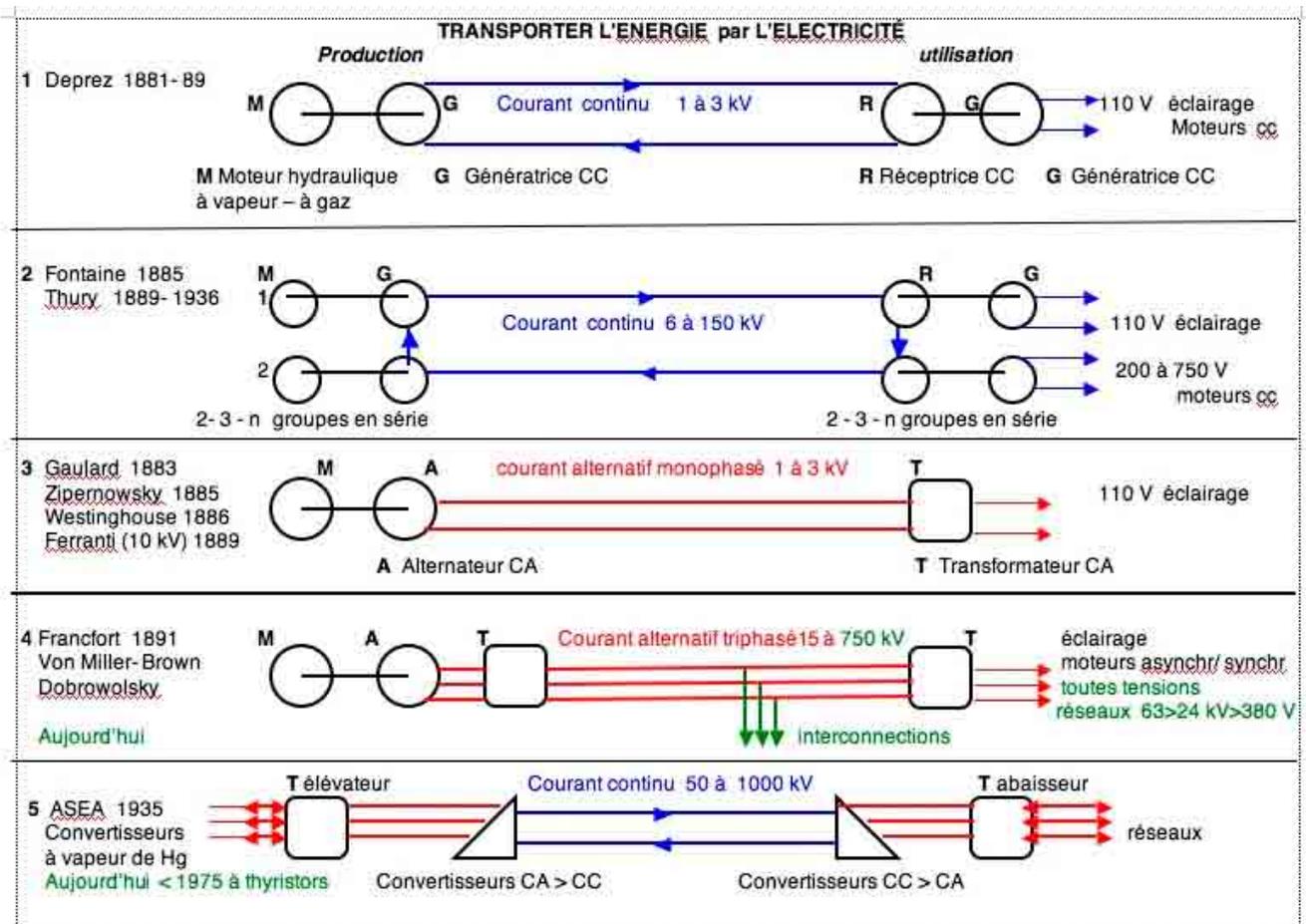
8 - En Italie, en mars 1888, **Ferraris** présente des modèles de moteurs plus évolués et publie ses travaux sur des **moteurs biphasés** à induits massifs. Il autorise Westinghouse à les construire librement, sans redevance.

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.

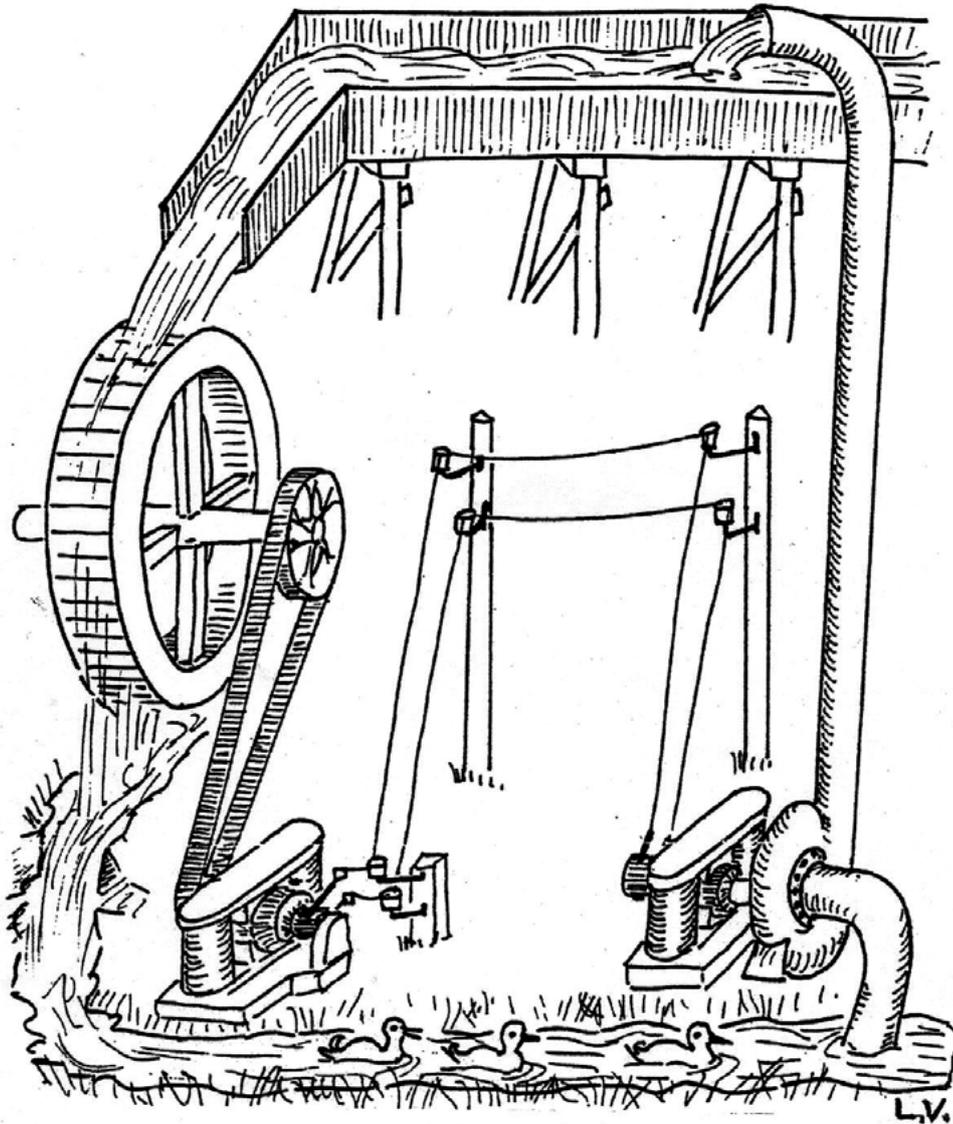
Le monde des électriciens s'est ainsi retrouvé devant une mutation fondamentale de sa base scientifique, que les esprits jeunes perçoivent mieux que les savants âgés, dont la grande expérience du connu semble faire écran à la perception de l'inconnu.

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.

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.

Pages 78 à 152 non reproduites

Suite .../.....

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.

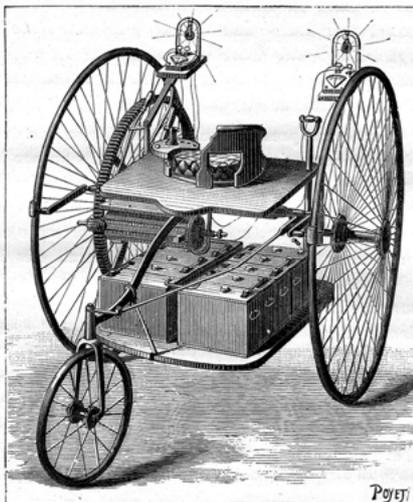
Et puis, la crainte du changement est un gène dominant de l'espèce humaine, y compris les techniciens, surtout âgés, au sommet d'une belle carrière (6).

L'auto-mobile

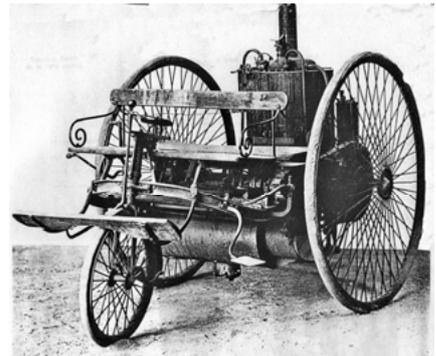
Comme pour la locomotion sur voie ferrée, la vapeur précéda l'électricité pour tracter des véhicules autonomes, auto-mobiles, c'est à dire transportant leur propre énergie.

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.



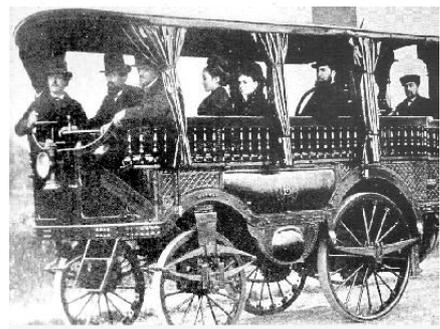
zg Tricycle Ayrton 1881



zd Tricycle à vapeur Thury - 1876



ze Calèche à Vapeur Bollée

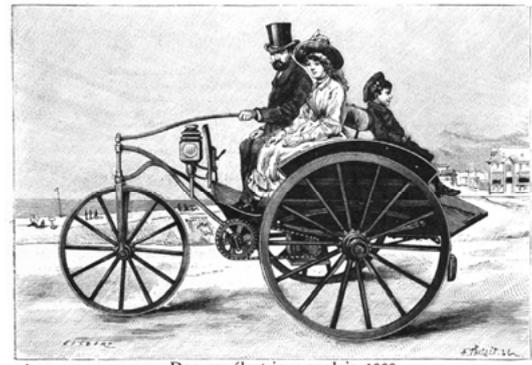


zf L'obéissante à vapeur d'Amédée Bollée - 1876

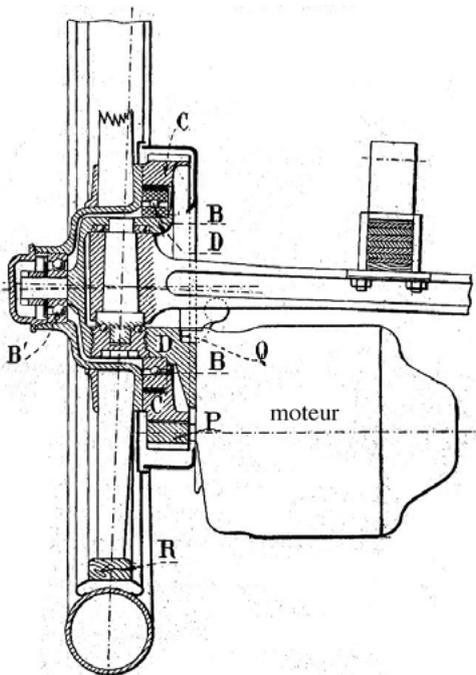
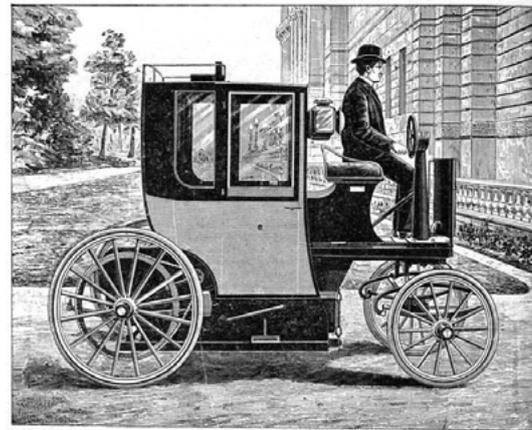
L'un des premiers véhicule électrique n'était qu'un tricycle, fabriqué par cet inventeur fécond, Gustave Trouvé, qui avait « trouvé » (comme le précisait son sigle, *Eureka*) un petit moteur efficace (IV-1). Avec 3 éléments Planté et ses 160 kg, il roulait en mars 1881, avant l'exposition, à 12 km/h 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.

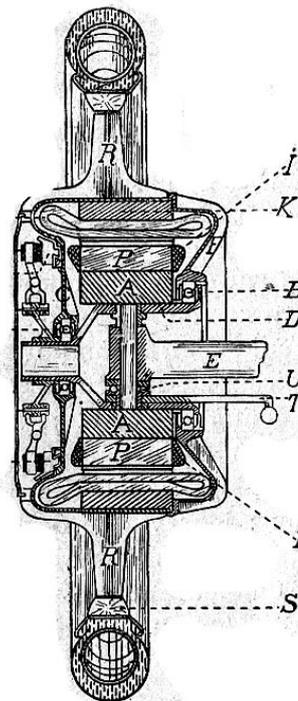
Le moteur, unique ou double, entraînait l'essieu arrière d'abord par chaîne, puis engrenages, et ensuite directement les roues arrière dans un modèle de Krieger (zk), ou même intégré dans la roue avant chez Porsche (zl), ce qui en faisait la première traction-avant, sans avoir besoin des délicates transmissions homocinétiques par cardan des « *Traction avant* » de Citroën en 1934.



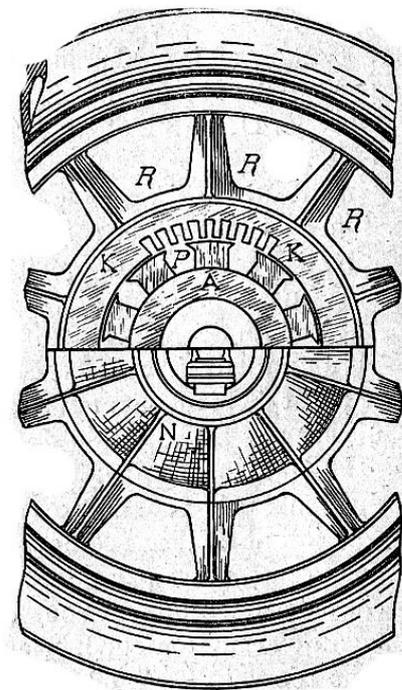
zh Dog-car électrique anglais -1888



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

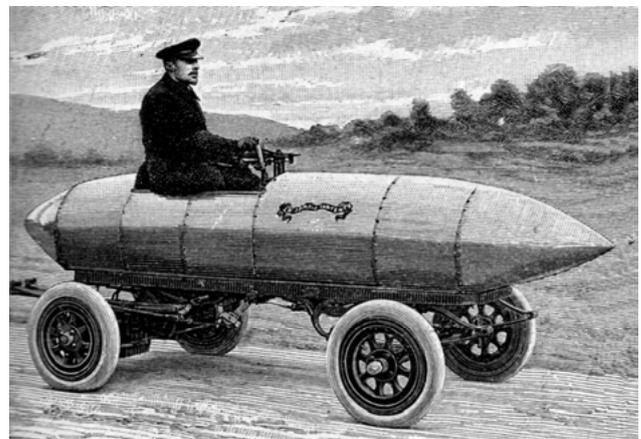


zm Station de charge des taxis Krieger - 1895

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).



zo Voiture électrique Jenatzy - Jamais contente - 1899

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



La fée électricité, an 2000.

Fin du tome IV

Pages 155 à 170 non reproduites