

# L'histoire du moteur électrique

Par Ilarion PAVEL

Ingénieur en chef des mines – Conseil général de l'Économie

Le moteur électrique trouve ses origines au XVIII<sup>e</sup> siècle dans des expérimentations de savants. Il connaît un premier essor industriel vers les années 1830 en vue d'applications dans les transports, mais se heurte à des difficultés liées aux coûts des solutions alternatives. Puis, il s'impose grâce à des innovations dans d'autres domaines (télégraphes, détonateurs, éclairage...), avant de revenir en force dans les transports (tramways et métros) à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, ainsi que dans des véhicules électriques. La densité énergétique de l'essence le rend durablement inutilisable pour les véhicules particuliers, alors que les applications électriques se multiplient dans les courants faibles (électroménager, musique, téléphonie, électronique), mais également forts (turboalternateurs, transports en commun), tout au long du XX<sup>e</sup> siècle. En France, ces industries passent en un siècle de quelques milliers à plus de un million de salariés. Les véhicules électriques reviennent en force au début du XXI<sup>e</sup> siècle dans le triple contexte du renchérissement des énergies fossiles, de leur raréfaction et des défis liés à l'effet de serre. Dans cet article, nous retraçons les grandes étapes de ces évolutions, avec leurs échecs et leurs succès.

## Introduction

La nécessité aujourd'hui de remplacer les combustibles fossiles par des énergies renouvelables est devenue une préoccupation centrale afin d'assurer à l'humanité des sources d'énergie durable et de lui permettre de réduire ses émissions de CO<sub>2</sub>.

Dans ce contexte, le véhicule électrique sera de plus en plus présent dans les transports du futur. Il consomme quatre fois moins d'énergie que son homologue à essence. Son moteur, électrique, présente un rendement de 90 %, contre 25 % pour le moteur à combustion. Et pour un poids huit fois moindre, il offre la même puissance<sup>1</sup>.

Inventé au XIX<sup>e</sup> siècle, le moteur électrique a connu un développement spectaculaire. Il fait aujourd'hui partie intégrante de nombreux objets de notre environnement : il est une composante indispensable des lave-linge et des aspirateurs ; il commande l'ouverture automatique des vitres et des portes des automobiles ; il fait fonctionner les ascenseurs ; vibre les téléphones mobiles ; il équipe les outils électroportatifs, mais il peut aussi propulser des navires, permettre de compresser le gaz dans les pipelines et faire fonctionner des grues et des grandes installations industrielles.

Son histoire a été mouvementée.

<sup>1</sup> Malheureusement, les performances de stockage de l'énergie électrique par des batteries restent aujourd'hui limitées : un kilogramme de batterie stocke 80 fois moins d'énergie qu'un kilogramme d'essence, ce qui limite l'autonomie de l'automobile électrique. Un important effort de recherche est engagé dans le but d'améliorer ce point faible.

## Électricité et magnétisme

Au XVIII<sup>e</sup> siècle, l'électricité était produite à l'aide de machines électrostatiques, en frottant divers matériaux : par exemple, une sphère de soufre en rotation contre un tissu. On la stockait dans des bouteilles de Leyde, qui sont des condensateurs électriques rudimentaires.

Vers la fin du siècle précité, Luigi Galvani, médecin italien, après avoir placé des objets métalliques sur les cuisses de grenouilles, observe que les muscles de celles-ci se contractent. À tort, il pense avoir découvert une nouvelle forme d'électricité, qu'il appelle « électricité animale ». C'est Alexandre Volta, son contemporain, qui comprend que cette électricité n'est pas intrinsèque aux animaux, mais se produit lorsque l'on met en contact deux métaux de nature différente. En 1800, il construit la première batterie électrique, la pile Volta, laquelle est constituée d'un empilement alterné de disques de cuivre et de zinc, séparés par des morceaux de papier imbibés avec une solution d'eau salée.

La pile Volta ouvre de nouvelles perspectives dans la science de l'électricité : bien qu'elle génère une différence de potentiel plus faible que celle des machines électrostatiques, elle produit des courants plus forts et qui durent bien plus longtemps. C'est le courant fourni par une telle pile que le physicien danois, Hans Christian Oersted, fait passer en 1820 dans un fil de platine placé juste au-dessus d'une boussole. Ce courant, en traversant le fil, fait dévier l'aiguille de la boussole, de manière analogue au champ magnétique terrestre. Il existerait donc un lien entre les phénomènes électriques et ceux magnétiques.

Cette découverte est accueillie en France avec réserve, car l'on pensait, sous l'influence de Charles de Coulomb, qu'il n'y avait aucun lien entre les phénomènes électriques et les phénomènes magnétiques. André-Marie

Ampère ne partageait pas ce scepticisme et se lança dans un travail acharné autant expérimental que théorique, qui, au bout de quelques semaines, l'amena à comprendre et à exprimer de façon quantitative les liens entre les courants électriques et les champs magnétiques. À cette occasion, Ampère inventa le solénoïde, une bobine formée d'un fil conducteur enroulé en forme d'hélice autour d'un long cylindre. Parcouru par un courant électrique, le solénoïde fournit un champ magnétique bien plus fort et plus homogène qu'une simple boucle de fil conducteur.

De l'autre côté de la Manche, William Sturgeon découvrait qu'en insérant une barre de fer dans un solénoïde traversé par un courant électrique, le champ magnétique augmente de façon spectaculaire. Il a ainsi inventé l'électroaimant. Lorsqu'on le connecte à une pile Volta, l'électroaimant produit un champ magnétique, qui est capable de soulever des morceaux de fer. L'électroaimant est le premier dispositif électromécanique : son action mécanique peut être commandée par un interrupteur électrique. Il jouera un rôle clé dans l'invention du moteur électrique.

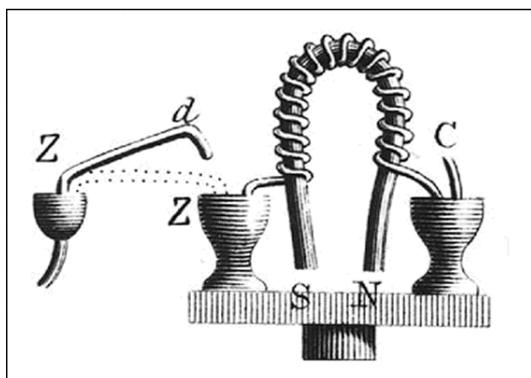


Figure 1 : Formé de spires de cuivre enroulées autour d'un noyau de fer en forme de cheval, l'électroaimant de Sturgeon pouvait soulever des masses de quelques kilos. Les contacts électriques sont assurés par deux cuves contenant du mercure. Sur le schéma ci-dessus, elles sont notées Z et C (la troisième cuve, à gauche, servait d'interrupteur par l'intermédiaire de la tige d que l'on baissait ou levait). Le fil en cuivre n'est pas isolé, le fer est laqué pour éviter tout court-circuit entre les spires – Source : WikiCommons.

Outre-Atlantique, Joseph Henry construit des électroaimants de plus en plus performants. Il diminue leur taille, tout en augmentant leur force d'attraction magnétique. Henry recouvre le fil de cuivre avec un isolant en soie, ce qui permet de serrer les enroulements de la bobine et de les disposer en plusieurs couches. La force d'attraction des électroaimants d'Henry dépasse vite celle des aimants permanents. Ils sont principalement destinés à être utilisés dans des laboratoires de recherche ou pour effectuer des démonstrations publiques (une démonstration spectaculaire consistait à maintenir suspendu un barreau de fer pesant quelques centaines de kilogrammes grâce à l'attraction d'un électroaimant. Lorsque l'on coupait l'alimentation de ce dernier, le barreau tombait au sol avec grand fracas). Par ailleurs, certains électroaimants furent commercialisés : un de ceux construits par Henry fut ainsi employé par la société Penfield and Taft Ironworks, située dans l'État de New York, pour aimanter les cylindres d'acier utilisés dans la séparation du minerai de fer.

## Invention du moteur électrique

C'est en essayant de démontrer qu'un fil traversé par un courant électrique produit un champ magnétique circulaire, qu'en 1821, Michael Faraday met au point un système mécanique tournant. Dans une cuve remplie de mercure, il plonge verticalement un barreau aimanté qu'il maintient fixe. Ensuite, il fait pendre librement une tige conductrice qui touche la surface du liquide. En connectant la tige à une cellule galvanique, Faraday remarque qu'elle tourne autour du barreau, son extrémité libre décrivant des cercles ; c'est le résultat de l'interaction entre le courant qui traverse la tige et le champ magnétique de l'aimant. C'est le premier dispositif connu de conversion d'énergie électrique en mouvement mécanique continu. Néanmoins, il ne connaîtra pas d'application pratique et restera un appareil de laboratoire.

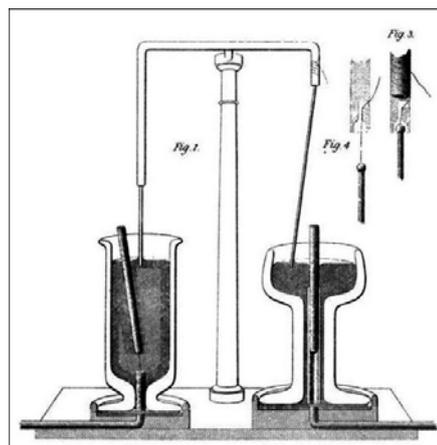


Figure 2 : Le « moteur » tournant de Faraday. Dans le récipient de gauche, la tige conductrice suspendue touche la surface du mercure. Au centre du récipient de droite, se trouve le barreau aimanté. Alimentée par un courant électrique, la tige tourne autour de l'aimant – Source : Wikipedia.

En 1831, Henry invente un moteur électrique oscillant. La partie mobile est un électroaimant qui bascule sur un axe horizontal. Sa polarité s'inverse automatiquement pendant son mouvement grâce à deux paires de fils conducteurs qui se connectent alternativement à deux cellules galvaniques. Deux aimants permanents verticaux, dont les pôles sont orientés dans la même direction, attirent et repoussent alternativement les extrémités de l'électroaimant, ce qui le fait osciller.

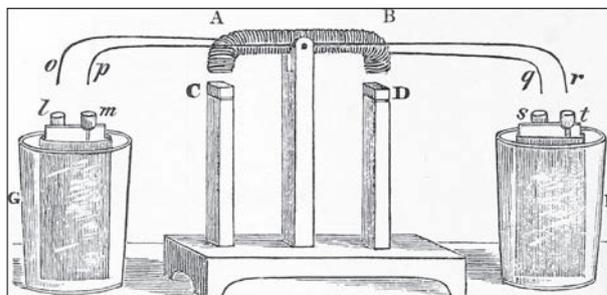


Figure 3 : Le moteur oscillant de Henry. L'électroaimant mobile AB est attiré successivement par les aimants permanents C et D, et effectue des oscillations. Cela est dû à la polarité d'alimentation qui s'inverse automatiquement pendant le mouvement opéré par les deux paires de fils conducteurs qui se connectent alternativement aux deux piles électriques – Source : *American Journal of Science*.

## Échec commercial des premiers moteurs électriques

Au début des années 1830, la fabrication et la vente de la technologie électrique étaient en grande partie artisanales : quelques fabricants fournissaient des instruments pour les laboratoires et pour les démonstrations publiques de savants et de quelques particuliers passionnés.

Mais, à la fin des années 1830, des entrepreneurs, des financiers et des gouvernements s'intéressent de plus en plus aux applications de cette nouvelle technique. Les fabricants et les consommateurs se multiplient ; on dépose des brevets ; on publie des articles de presse. La commercialisation des produits reposant sur des techniques électriques bénéficie de la généralisation de la société anonyme par actions qui permet d'entreprendre des projets nécessitant d'importants investissements financiers à forts risques sur le long terme.

On commence alors à voir le moteur électrique comme une alternative possible à la force musculaire des animaux et des ouvriers. Le moteur à vapeur avait certes déjà largement remplacé cette force, mais il présentait plusieurs inconvénients. D'abord, le moteur à vapeur de petite taille, comme celui qui équipe les ateliers, est de faible rendement : c'est pourquoi l'automobile à vapeur ne se développera pas, contrairement à la locomotive ou au bateau à vapeur. Par ailleurs, il fonctionne en continu ; on ne peut donc pas l'éteindre et l'allumer à volonté – maintenir la pression de la vapeur exige en effet de consommer en permanence du combustible, il n'est donc pas adapté aux tâches intermittentes exécutées par des machines-outils. En outre, ces machines sont connectées au moteur par l'intermédiaire d'un système mécanique compliqué se composant d'arbres et de courroies de transmission. Enfin, le moteur à vapeur est dangereux, car il peut exploser ; en outre, il est sale et bruyant, et nécessite beaucoup d'entretien.

C'est dans ces mêmes années 1830 que l'on se met à imaginer pour le moteur électrique des applications multiples pour réaliser les tâches domestiques dans les foyers : pompes à eau, machines à laver, ventilateurs, barattes, torrificateurs, broyeurs... Son triomphe semble inévitable.

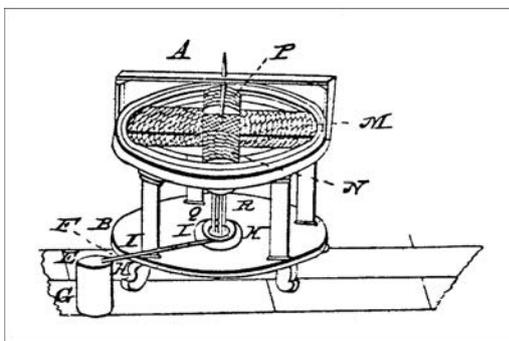


Figure 4 : Le moteur de Davenport est formé de deux bobines croisées, qui tournent suivant un axe vertical dans un anneau en bois muni de deux aimants permanents en forme de demi-cercle. Les bobines sont alimentées par un commutateur, visible à l'extrémité inférieure de l'axe du moteur – Source : Illustration extraite du brevet n°132 déposé en 1837.

En 1833, lors d'une visite dans une mine de fer, le forgeron Thomas Davenport voit fonctionner un des électroaimants d'Henry. Intrigué, il en achète un. De retour dans son atelier, il le démonte et l'étudie avec attention. Persuadé que la force électrique remplacera bientôt la force de la vapeur, Davenport construit quelques mois plus tard un des premiers moteurs électriques rotatifs, qu'il brevète en 1837. Afin de fabriquer en série et de commercialiser son invention, il fonde une société par actions avec la participation d'associés.

Hélas, les résultats ne sont pas à la hauteur des attentes. Le coût du zinc utilisé dans les batteries, qui servent de source d'alimentation, rend le moteur électrique non compétitif par rapport au moteur à vapeur. Le moteur électrique est un échec commercial, et Davenport fait faillite<sup>2</sup>.

Initialement très optimiste pour l'avenir du moteur électrique, James Prescott Joule devient de plus en plus sceptique. Dans une étude publiée en 1841, il montre qu'une machine à vapeur alimentée avec un kilogramme de charbon produit cinq fois plus d'énergie mécanique qu'un moteur électrique alimenté par une batterie consommant un kilogramme de zinc. Compte tenu des prix comparés du charbon et du zinc, Joule arrive à la conclusion que « le moteur alimenté par batteries est un dispositif désespérément inexploitable ».

En dépit de cette conclusion pessimiste, les inventeurs ne se découragent pas. Aux États-Unis, Charles Grafton Page, avec l'aide du gouvernement américain, construit une locomotive utilisant un moteur électrique oscillant. Deux bobines alignées, alimentées successivement, attirent à tour de rôle une barre en fer. Le mouvement alternatif avant-arrière de la barre est ensuite converti en mouvement rotatif par un mécanisme de type bielle-manivelle. La locomotive est testée avec des passagers à son bord en 1851, sur la ligne Washington-Baltimore. Des étincelles traversent l'isolation électrique des bobines, tandis que les vibrations du moteur endommagent les fragiles diaphragmes des cellules galvaniques. Après 8 km, Page est obligé de rebrousser chemin.

Quelques années auparavant, des essais similaires avaient déjà été réalisés en Europe. En 1839, à Saint-Petersbourg, Moritz Jacobi testait sur la Neva une barque propulsée par un moteur électrique ; elle transportait à son bord des passagers. En 1842, en Angleterre, Robert Davidson construisait une locomotive électrique, appelée Galvani, dont il fit des essais sur la ligne Edinburgh-Glasgow. Mais la locomotive de Davidson, tout comme la barque électrique de Jacobi et la locomotive de Page, ne furent pas viables économiquement.

Le moteur électrique semblait définitivement condamné.

<sup>2</sup> Son origine modeste et sa vie tragique (il meurt à 48 ans, ruiné et malade) confèrent à Davenport une place spéciale dans l'histoire de l'invention du moteur électrique. Cependant, à la même époque, il y eut bien d'autres essais visant à la fabrication de moteurs électriques, notamment en Europe, comme ceux d'Ányos Jedlik en Hongrie, de Moritz Jacobi en Allemagne ou de Sibrandus Stratingh and Christopher Becker aux Pays-Bas.

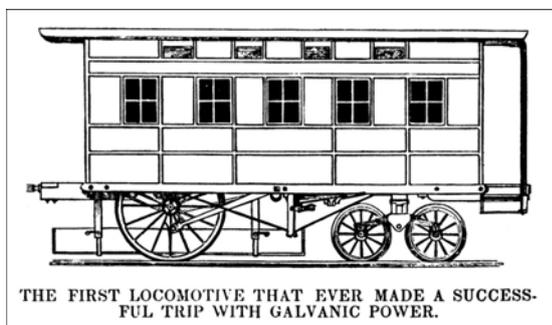
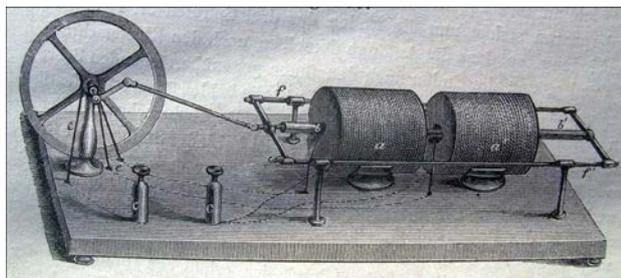


Figure 5 : En haut, la maquette du moteur oscillant de Page : deux paires de bobines alignées en tête à tête, alimentées successivement, attirent à tour de rôle une barre en fer. Le mouvement alternatif de la barre est converti en mouvement de rotation par le mécanisme bielle-manivelle. En bas, croquis de la locomotive électrique utilisant un tel moteur – Source : Wikipedia.

## D'autres applications de l'électricité se développent

Malgré ces échecs successifs du moteur électrique, d'autres applications de l'électricité voient le jour. Ces applications concernent des secteurs spécifiques qui ne sont pas en concurrence directe avec le moteur à vapeur. Elles sont moins gourmandes en énergie, au moins dans la première phase de leur développement, les batteries sont donc de puissance suffisante pour les alimenter.

## La galvanoplastie

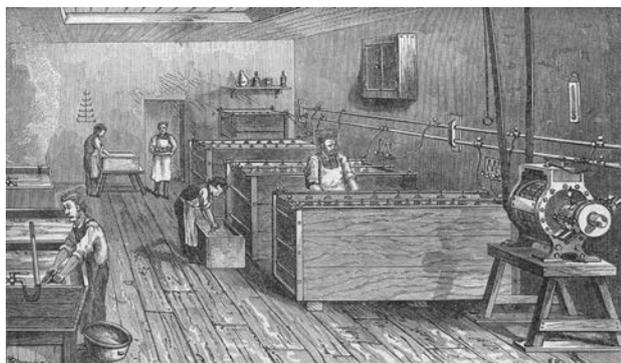


Figure 6 : Un atelier de galvanoplastie. Dans les premiers ateliers, l'électricité était fournie par des batteries, ce n'est que plus tard que ces dernières seront remplacées par des générateurs électriques, comme celui que l'on peut voir à droite sur cette photo – Source : Wikipedia.

Issue des travaux d'amélioration des éléments galvaniques, la galvanoplastie, technique de dépôt de métaux à l'aide d'un courant électrique, connaît un déve-

loppement rapide et de multiples débouchés : réalisation de plaques d'impression pour l'imprimerie, de couches de protection anticorrosion, dépôt de métaux précieux sur des objets de grande consommation ou sur des œuvres d'art. Ce succès industriel s'explique en partie par le fait qu'ouvrir un atelier de galvanoplastie demandait peu d'investissements en termes de matériels.

## Le détonateur électrique

Formé d'un fil conducteur fortement chauffé par le passage du courant électrique, le détonateur électrique se substitue graduellement à la mèche classique, qui est peu fiable, dont le temps de combustion est difficile à contrôler, ce qui est à l'origine de nombreux accidents. D'abord utilisé par les militaires pour faire détoner à distance des charges explosives sous-marines et des mines flottantes, le détonateur électrique trouve un large usage civil pour servir à l'exploitation des mines et des carrières, la construction de canaux, de tunnels et dans les chemins de fer.

## Le télégraphe électrique

Le télégraphe électrique supplante le télégraphe optique. Ce dernier, inventé pour transmettre rapidement des messages à distance, ne fonctionnait que durant la journée, il dépendait fortement de la météo et ne permettait de transmettre que deux mots par minute. Il nécessitait en outre des stations-relais tous les 30 kilomètres. C'est à partir du moment où des expériences ont montré que les signaux électriques peuvent être transmis à distance par des fils conducteurs que le télégraphe électrique devint une réalité. Son développement est dû aux travaux de plusieurs savants (Ampère, Arago, Gauss, Weber, Henry, Barlow, Wheatstone), mais c'est Samuel Morse qui réussit à produire, en 1844, le premier système opérationnel entre Baltimore et Washington.

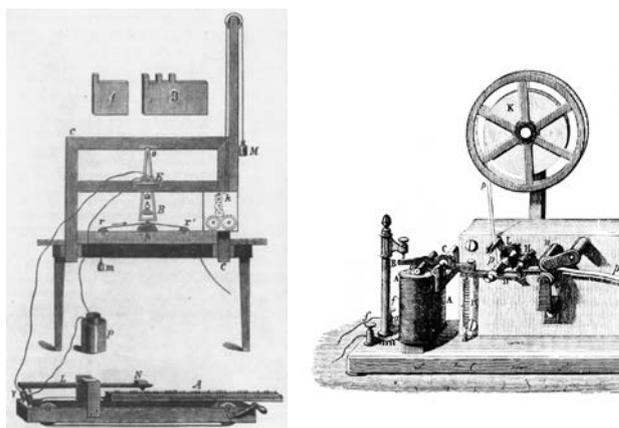


Figure 7 : Le télégraphe de Morse : à gauche, l'appareil original. À droite, une version améliorée de celui-ci – Source : WikiCommons.

## La transmission à distance d'informations, d'une alarme et la réalisation de contrôles à distance

Dans les années qui suivent l'invention du télégraphe, plusieurs systèmes électriques de transmission à distance d'informations, d'une alarme et de réalisation de

contrôles à distance voient le jour : système de dialogue entre la cabine de pilotage et la salle des machines d'un bateau, système de guidage de navires, instruments de mesure de la vitesse, instruments de contrôle de la pression de la vapeur dans les chaudières, systèmes d'alarme antiviol, systèmes de transmission d'images à distance, systèmes de contrôle de la température, horloges électriques synchronisées à distance, systèmes d'alerte incendie, systèmes de signalisation ferroviaire...

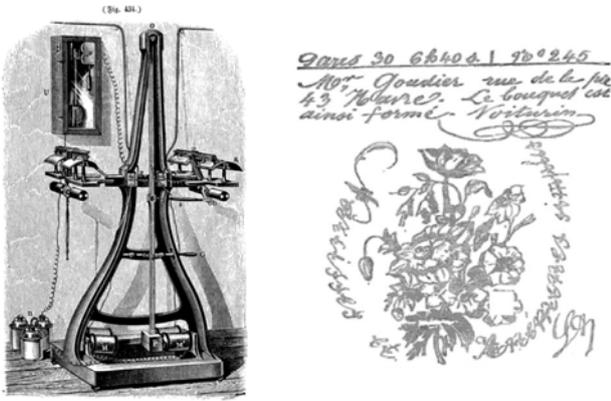


Figure 8 : À gauche, un pantélégraphe, l'ancêtre du fax. À droite, une image transmise grâce à cet appareil – Source : Wikipedia.

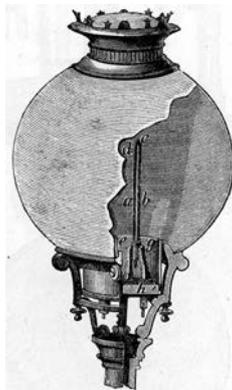
### L'allumage instantané

L'éclairage des salles de spectacles est assuré par plusieurs centaines de becs à gaz. Ces derniers sont équipés de systèmes d'allumage instantané : un électroaimant ouvre le robinet du gaz et un fil de platine chauffé à blanc allume le gaz.

### L'arc électrique

L'arc électrique est utilisé comme source de lumière dans les studios photographiques ou dans les spectacles de lanterne magique<sup>3</sup>. Il est également utilisé dans les projecteurs pour servir de source lumineuse pendant les opérations militaires menées la nuit ou pour l'éclairage des halles, des usines et des lieux publics.

Figure 9 : Ci-contre, une lampe à arc électrique. En colonne de droite, éclairage grâce à de telles lampes de l'avenue de l'Opéra, à Paris, à l'occasion de l'Exposition universelle de 1878 – Source : Wikipedia.



Avec la croissance du commerce maritime et les besoins accrus en matière de sécurité, les phares de

signalisation maritime utilisent, dans le cadre d'essais, l'arc électrique, dont la lumière éclatante est nettement plus visible que celle des traditionnelles lampes à huile ou à gaz. Consommant plus d'électricité, les phares à arc électrique rendent nécessaire le remplacement des piles électriques par des magnétos électriques couplés mécaniquement à des moteurs à vapeur.

C'est cette demande croissante d'énergie électrique qui va stimuler les efforts des fabricants pour améliorer les sources d'énergie électrique. L'énergie fournie par une batterie devient vite insuffisante, les constructeurs se tournent alors vers les générateurs électriques<sup>4</sup>.

## Les générateurs électriques

Oersted montre qu'un conducteur engendre un champ magnétique aussi longtemps qu'un courant le traverse. Par référence au principe de l'unité des forces, les physiciens se sont immédiatement demandé si la réciproque était vraie : le champ magnétique d'un aimant peut-il engendrer un courant électrique dans une bobine située dans sa proximité ? Les expérimentateurs se limitant à placer une bobine autour d'un aimant, le galvanomètre n'indiquait aucun courant. Ces premières expériences donnent des résultats négatifs.

Ce n'est qu'après plusieurs échecs, qu'en 1831, Faraday annonce la réussite de ses travaux. Dans le cadre de ceux-ci, il place deux bobines séparées l'une de l'autre sur un même anneau de fer, l'une d'elles étant connectée à un galvanomètre. C'est précisément à l'instant où il connecte ou déconnecte l'autre bobine reliée à une batterie que l'aiguille du galvanomètre dévie brièvement, puis revient à zéro. Le même phénomène se produit si, au lieu de connecter la batterie, il approche ou éloigne de la bobine un aimant permanent. Faraday a ainsi découvert l'induction électromagnétique : ce n'est pas un champ magnétique constant, mais un champ magnétique variable qui engendre un courant électrique.

L'induction électromagnétique permet donc de transformer un mouvement mécanique (par exemple, le mou-



<sup>4</sup> Le moteur électrique est un dispositif qui, alimenté par un courant électrique, produit un mouvement mécanique, en général de rotation. Le générateur électrique réalise la conversion inverse : entraîné manuellement, par un moteur à vapeur ou par une turbine hydraulique, il produit un courant électrique et peut donc être utilisé comme source d'énergie électrique.

<sup>3</sup> Pour plus d'informations sur ces spectacles, voir : <https://journals.openedition.org/narratologie/13697>

vement d'un aimant permanent) en électricité, ce qui a ouvert la voie à l'invention du générateur électrique. C'est encore Faraday qui a mis au point le premier dispositif expérimental capable de produire de l'électricité, s'inspirant probablement des machines électrostatiques. Un disque de cuivre, monté sur un cadre, tourne entre les pôles d'un aimant permanent en forme de fer à cheval. En connectant un galvanomètre entre l'axe du disque et sa jante, Faraday a mis en évidence le passage d'un courant électrique. Le disque de Faraday tout comme son moteur électrique resteront des appareils de laboratoire, le rendement de ce dernier étant trop faible pour en faire un générateur électrique.

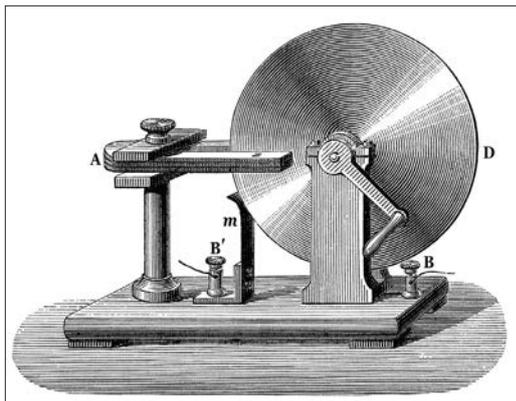


Figure 10 : Le disque de Faraday tourne entre les pôles d'un aimant permanent A. Un fil du galvanomètre est connecté au contact B, lié à l'axe du disque D, l'autre fil est relié au contact B', lequel est connecté à la jante par l'intermédiaire d'une lamelle élastique notée m – Source : Wikipédia.

Le premier générateur électrique à avoir connu une application pratique a été réalisé en 1832 par Hippolyte Pixii, un constructeur d'instruments travaillant en étroite collaboration avec Ampère. Entraîné par une manivelle, un aimant permanent en forme de fer à cheval tourne devant une bobine à noyau de fer. Les pôles nord et sud de l'aimant inversent successivement le sens des lignes des champs magnétiques dans le noyau de fer et, en conséquence, induisent un courant électrique alternatif dans la bobine.

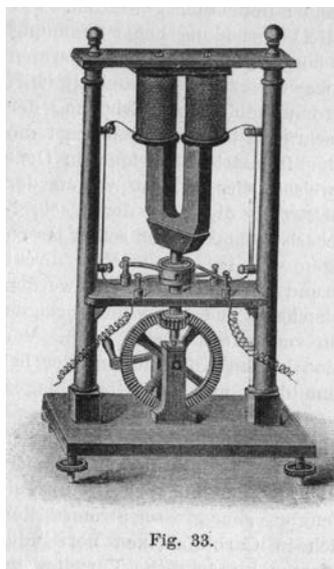


Figure 11 : Le magnéto de Pixii. Mis en mouvement par une manivelle, l'aimant permanent en forme de fer à cheval tourne sur un axe vertical sous une bobine enroulée autour d'un noyau de fer. Les pôles nord et sud de cet aimant, passant successivement à proximité du noyau en fer, font varier le champ magnétique et, en conséquence, induisent un courant électrique dans la bobine. En dessous de l'aimant, solidaire avec l'axe de rotation, se trouve le commutateur d'Ampère – Source : Wikipédia.

Afin de remplacer les éléments galvaniques par des générateurs électriques, en particulier dans les applications d'électrometallurgie, lesquelles nécessitent un courant de même polarité, Ampère introduit le commutateur. C'est un dispositif qui se présente sous la forme d'un cylindre métallique fendu fixé sur l'axe de rotation, qui permet d'inverser le sens du courant dans le circuit extérieur et ainsi d'obtenir un courant pulsé à la place du courant alternatif<sup>5</sup>. Ce générateur contient un aimant permanent, d'où son nom de magnéto<sup>6</sup>.

En 1845, Charles Wheatstone a l'idée de remplacer les aimants permanents de ces magnétos par des électroaimants, qui, alimentés par une batterie, sont capables de fournir des champs magnétiques nettement plus importants. En 1864, Henry Wilde alimente les électroaimants à l'aide d'une petite magnéto couplée à l'axe de rotation du générateur, ce qui rend la batterie superflue.

Par la suite, les inventeurs se sont rendu compte qu'ils pouvaient aussi se dispenser de la petite magnéto : ils ont ainsi découvert le principe de l'*autoexcitation*. Dans les faits, même si les électroaimants ne sont pas alimentés, une aimantation rémanente persiste dans leur noyau de fer. Lorsque l'on fait tourner les électroaimants, cette rémanence suffit à induire un faible courant électrique dans le circuit du générateur. Il suffit alors de coupler la sortie du générateur aux bobines des électroaimants pour que ces derniers soient traversés par un courant électrique et que leur pouvoir d'aimantation augmente. En conséquence, le générateur produit un courant de sortie plus fort, et ainsi de suite. Au fur et à mesure que le courant de sortie du générateur augmente, l'aimantation des électroaimants s'accroît elle aussi, le générateur atteint rapidement son régime de fonctionnement normal.

Plusieurs améliorations sont apportées dans les années suivantes. Traditionnellement, chaque bobine avait son propre noyau de fer. À la fin des années 1860, Werner Siemens et Antonio Pacinotti, indépendamment l'un de l'autre, placent les bobines sur un seul noyau de fer

<sup>5</sup> Chronologiquement, le courant continu fut découvert avant le courant alternatif : d'abord dans le cadre de l'étude des décharges électrostatiques, puis à travers les éléments galvaniques. Les premières applications de l'électricité et du magnétisme, à l'instar des électroaimants ou de l'électrometallurgie, utilisaient des courants continus.

<sup>6</sup> La magnéto est aujourd'hui encore utilisée pour alimenter des petits moteurs à essence qui équipent certaines motos, barques à moteur, tondeuses à gazon et tronçonneuses. La magnéto utilise une partie de l'énergie mécanique de la rotation du moteur qu'elle transforme en électricité, laquelle est utilisée ensuite par les bougies pour produire des étincelles qui permettent l'allumage du mélange d'air et d'essence dans la chambre de combustion. Ainsi, un moteur équipé d'une magnéto ne nécessite pas de batterie électrique, ce qui le rend peu volumineux. Mais son démarrage est manuel : pour le démarrer, il faut le faire tourner à l'aide d'une manivelle ou d'un « démarreur ».

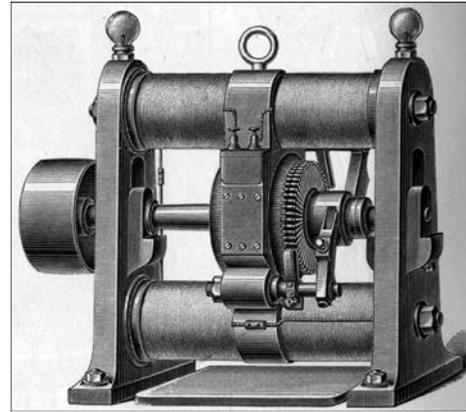
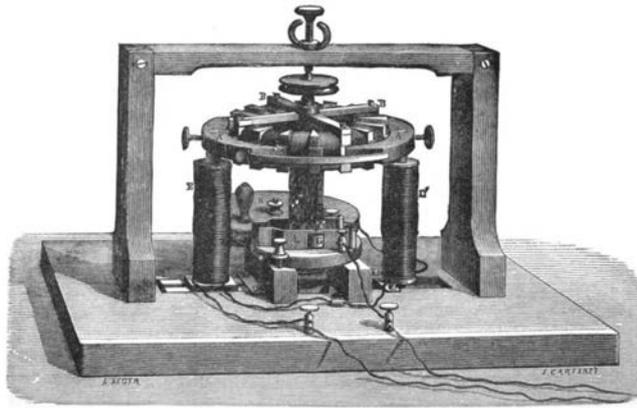


Figure 12 : À gauche, la dynamo de Pacinotti. Le champ magnétique produit par deux bobines verticales traverse les bobines du rotor. Ce dernier, entraîné par une manivelle, tourne sur un axe vertical. À droite, la dynamo de Gramme. Le stator est le cadre en fer muni de quatre bobines, qui concentrent le champ magnétique dans le rotor – Source : Wikipedia.

en forme d'anneau : c'est l'invention de la dynamo<sup>7</sup>. Au début de la décennie suivante, Zénobe Gramme invente un nouveau type d'enroulement et diminue la distance entre le rotor et le stator<sup>8</sup>. Ses dynamos présentent des rendements supérieurs et sont une réussite commerciale.

## La renaissance du moteur électrique

Selon la légende, lors de l'Exposition universelle tenue en 1873 à Vienne, Gramme ou l'un de ses collaborateurs connecta par inadvertance deux dynamos. Sous l'effet de l'entraînement de l'axe de l'une d'entre elles au moyen d'un moteur à vapeur, l'autre commença à tourner rapidement. Gramme découvrit ainsi que la dynamo est une machine électrique réversible, qu'elle peut fonctionner comme un moteur. Les essais qui ont suivi ont montré que les câbles conducteurs qui connectaient le moteur à la dynamo pouvaient être d'une longueur dépassant le kilomètre. L'électricité pouvait donc être utilisée pour la transmission de l'énergie à distance. C'est cette forme de transmission qui se généralisera par la suite, et non les autres méthodes, en général mécaniques, de transmission de l'énergie qui furent testées auparavant (tubes à air comprimé, conduites remplies d'eau, courroies couplées à un long arbre tournant, câbles en acier enroulés sur des poulies).

L'énergie électrique est par ailleurs facile à distribuer : il suffit de connecter les divers moteurs à alimenter à un

<sup>7</sup> La dynamo est donc une magnéto dont on a remplacé les aimants permanents par des électroaimants, dont les bobines se trouvent sur un seul cadre ferromagnétique, ce qui optimise le circuit du flux magnétique. La dynamo est munie d'un commutateur et produit donc du courant pulsé. Avec l'arrivée du courant alternatif, la dynamo s'affranchira du commutateur et prendra l'appellation d'alternateur, dispositif encore utilisé aujourd'hui dans les automobiles : pour alimenter la batterie et l'installation électrique, le courant alternatif produit par l'alternateur est transformé en courant continu par des circuits électroniques à base de dispositifs semi-conducteurs appelés « diodes ». Notons que la « dynamo du vélo est improprement nommée, c'est en effet une magnéto.

<sup>8</sup> La partie fixe d'un générateur ou d'un moteur électrique est appelée « stator », la partie mobile, celle qui tourne, est dénommée « rotor ».

même générateur. On réalise alors qu'un même réseau pourra alimenter à la fois des systèmes d'éclairage électrique et d'autres appareils. Il ne restait plus qu'à évaluer les rendements de conversion et les pertes en ligne pour établir si ce schéma était viable du point de vue économique.

On prit alors conscience de la variété des applications potentielles. Dans l'usine, on ne se bornera plus à transmettre l'énergie mécanique en utilisant des arbres en ligne, des courroies, de l'air comprimé ou la pression hydraulique. Chaque machine pourra être dotée de son propre moteur électrique, lequel sera facile à commander, l'énergie étant transmise efficacement, pratiquement sans pertes. Dans l'agriculture, les moteurs électriques pourront remplacer l'énergie musculaire humaine, mais aussi animale pour moudre le grain ou pomper l'eau d'irrigation. En matière de transports, les villes pourront être équipées d'omnibus électriques. Quant aux foyers, ils pourront bénéficier de nombreux appareils électroménagers.

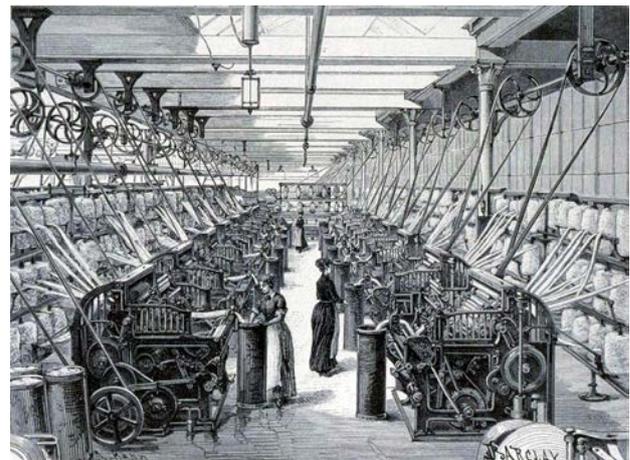


Figure 13 : Une usine textile équipée de nombreuses machines électriques. Ces diverses machines sont mises en mouvement par l'intermédiaire d'un système complexe d'arbres et de courroies, alimenté à partir d'un moteur à vapeur, qui constitue la source d'énergie principale – Source : Wikipedia.

Ces applications verront effectivement le jour. Mais il restait une étape à franchir. L'électricité est certes une forme d'énergie facile à transporter et à distribuer,

mais elle est très difficile à stocker. La magnéto, puis la dynamo avaient augmenté la puissance générée par rapport à celle de l'élément galvanique, mais elles n'avaient pas résolu le problème du stockage<sup>9</sup>. Les ingénieurs comprirent alors qu'il fallait considérer la chaîne dans sa globalité : l'énergie électrique est produite dans des centrales électriques par des générateurs, est transportée sur de longues distances *via* des réseaux de distribution et est utilisée aussitôt par les consommateurs. Un tel schéma implique d'énormes investissements financiers.

## Courant alternatif versus courant continu

À la fin des années 1870, Edison, déjà célèbre pour son invention du phonographe, veut développer un réseau de distribution d'électricité pour remplacer l'éclairage classique à bec de gaz. Il s'associe à des hommes d'affaires et fonde la société Edison Electric Light, dans le cadre de laquelle il perfectionne et commercialise l'ampoule électrique et dépose une multitude de brevets concernant des générateurs, des moteurs, des conducteurs, des fusibles ou encore des compteurs électriques.

En 1882, Edison construit la première centrale électrique dans le but d'éclairer le quartier de Wall Street, à New York. Il utilise les connaissances en mathématiques d'un de ses collaborateurs, Frank J. Sprague, le futur inventeur de l'ascenseur électrique, pour concevoir de manière optimale ses projets. Sprague améliore le moteur à courant continu et le rend utilisable à grande échelle : son moteur est puissant, tourne à une vitesse constante malgré les charges variables, ne génère plus d'étincelles et restitue le surplus d'énergie à la centrale.

Edison n'est pas le seul à vouloir construire un système de distribution de l'électricité. Inventeur d'un système de freinage pour les trains, George Westinghouse, lui aussi, s'intéresse de plus en plus aux technologies électriques. Contrairement à Edison, qui conçoit son réseau de distribution à partir du courant continu, Westinghouse croit dans le courant alternatif.

Le courant continu ne peut pas être acheminé efficacement sur de grandes distances du fait des pertes ohmiques dans les conducteurs, dont les valeurs correspondent au produit de la résistance des conducteurs par le carré de l'intensité. Pour réduire ces pertes, on peut donc diminuer soit l'intensité, soit la résistance. Dans le premier cas, il faudrait travailler à une tension plus haute (pour garder la même puissance, qui correspond au produit de la tension par l'intensité du courant), ce qui pourrait endommager les appareils et mettre les

utilisateurs en danger. Dans le deuxième cas, il faudrait utiliser des conducteurs de cuivre de faible résistance électrique. Comme la résistance d'un câble est inversement proportionnelle à sa section, mais est proportionnelle à sa longueur, cela revient soit à utiliser des câbles très épais, donc très chers, soit à ne transporter l'énergie électrique que sur de courtes distances. C'est cette dernière solution qu'Edison adopte en préconisant la construction de petites centrales électriques dans chaque quartier.

Une autre solution, prônée par Westinghouse, est de concentrer la production de l'électricité dans une grande centrale, puis de la distribuer aux consommateurs. Il faudrait d'abord élever la tension à la sortie du générateur pour diminuer les pertes ohmiques en ligne, avant de transporter l'électricité par câbles jusqu'aux consommateurs et, une fois livrée, abaisser cette tension jusqu'aux valeurs permettant son utilisation. Mais la technologie disponible à l'époque ne permettait pas d'élever ou d'abaisser la tension d'un courant continu, alors que cela se faisait déjà très facilement pour un courant alternatif par l'intermédiaire du transformateur, qui a été inventé en 1881 par Lucien Gaulard et John Dixon Gibbs.

Au niveau des consommateurs, une ampoule électrique peut aussi bien fonctionner en courant continu qu'en courant alternatif. Dans ce dernier cas, une fréquence de 60 Hz s'avère suffisamment élevée pour que l'inertie thermique du filament rende l'éclairage constant : la lumière de l'ampoule ne tremblote pas au rythme des variations du courant. En revanche, les moteurs électriques conçus pour le courant continu ne pouvaient pas fonctionner en courant alternatif. Westinghouse avait donc besoin d'un moteur à courant alternatif, qui restait à inventer. Il s'intéressa alors aux travaux de Nikola Tesla sur les champs magnétiques tournants.

Tesla, qui était arrivé aux États-Unis en 1884, travaillait dans la société d'Edison, mais ce dernier était hostile au développement de dispositifs recourant au courant alternatif. Tant qu'il serait au service d'Edison, Tesla devrait travailler sur le courant continu. Et les divergences entre les deux inventeurs s'accroissent.

En 1886, Tesla démissionna et, grâce à l'aide d'investisseurs, il fonda sa propre société, Tesla Electric Company, au sein de laquelle il allait concrétiser ses recherches sur le moteur à courant alternatif et le système d'alimentation polyphasé. Dès 1888, Westinghouse acheta à prix d'or les brevets de Tesla et l'embaucha comme consultant.

## La Guerre des courants : Edison contre Tesla et Westinghouse

Malgré les avantages du courant alternatif, Edison s'entête. Entre 1887 et 1893, il mène une campagne de désinformation pour convaincre les investisseurs, les législateurs et les clients potentiels de la supériorité du courant continu. Westinghouse et Tesla ripostent. La bataille fait rage. On l'appellera plus tard, à juste titre, la « Guerre des courants ».

<sup>9</sup> Ce problème n'est aujourd'hui toujours pas résolu de manière satisfaisante. Le stockage présentant le plus grand volume résulte de l'utilisation, pendant les heures creuses, de l'excédent de l'électricité produite pour pomper l'eau et la remonter en amont des barrages hydroélectriques. Un grand effort de la recherche vise actuellement à améliorer les batteries électriques afin d'augmenter leur capacité de stockage non seulement pour résoudre le problème de l'intermittence des énergies solaires et éoliennes, mais aussi pour améliorer l'autonomie des véhicules électriques.

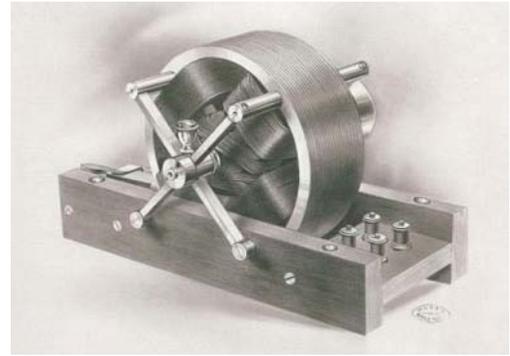
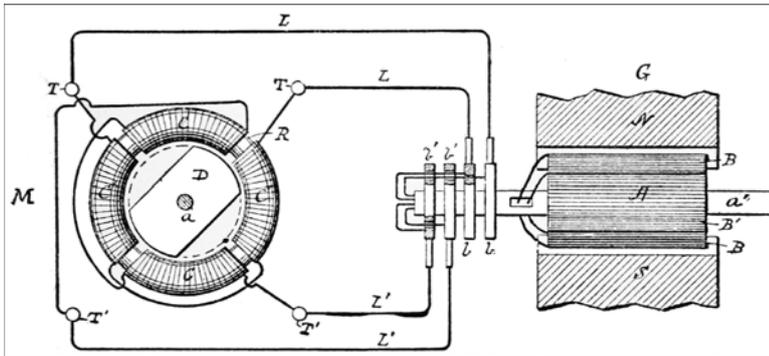


Figure 14 : Le moteur synchrone de Nikola Tesla. À gauche, le schéma de fonctionnement de ce moteur. À droite, la réalisation pratique de celui-ci. Les deux paires de bobines sont alimentées par des courants alternatifs déphasés de  $90^\circ$ , qui produisent en conséquence un champ magnétique tournant, qui met en mouvement l'aimant permanent D qui tourne à la fréquence des courants – Source : WikiCommons.

Edison prétend que le courant alternatif serait trop dangereux pour l'utilisateur et, pour appuyer son propos, organise des démonstrations publiques, où des chiens, des chats, des veaux et des chevaux sont électrocutés. Il va jusqu'à proposer d'utiliser le courant alternatif pour procéder à l'exécution de condamnés à mort et d'appeler « westinghouser » l'acte d'exécuter.

L'opposition d'Edison au courant alternatif s'explique par sa volonté de protéger son investissement, ses brevets, et donc ses éventuelles royalties, tous fondés sur la technologie du courant continu. En outre, son modèle économique reposait sur la construction d'un grand nombre de petites centrales électriques, dont la vente aurait pu lui générer des revenus importants.

En dépit du prestige et des ressources financières d'Edison, Westinghouse continue néanmoins à gagner de plus en plus de parts de marché. Exaspérés par l'entêtement d'Edison en faveur du courant continu, les actionnaires de la société Edison Electric font fusionner celle-ci, en 1892, avec Thomson-Houston, cette dernière ayant acquis un savoir-faire dans le domaine du courant alternatif<sup>10</sup>. La nouvelle société, General Electric, investit alors massivement dans la technologie du courant alternatif : elle aura cependant besoin de plusieurs années pour rattraper son retard par rapport à Westinghouse.

La Guerre des courants prend fin en 1893, quand le contrat de construction de la centrale hydroélectrique à proximité des chutes du Niagara est finalement attribué à Westinghouse. General Electric devra alors se contenter de la construction de la ligne de haute tension reliant cette centrale hydroélectrique à la ville de Buffalo. Bien plus tard, Edison reconnaîtra que son opposition

au courant alternatif aura été « la plus grande gaffe de sa vie »<sup>11</sup>.

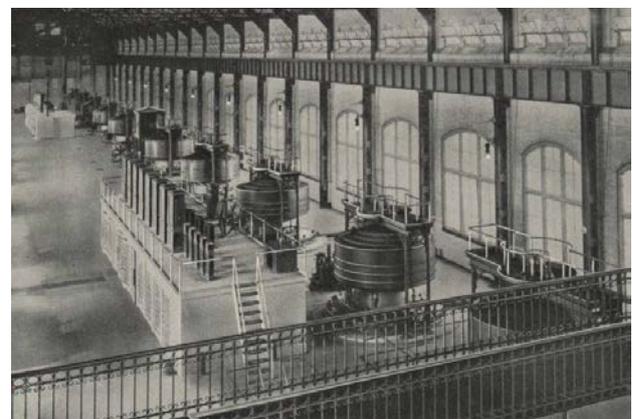


Figure 15 : La centrale hydroélectrique installée à proximité des chutes du Niagara. En haut, vue générale de la centrale. En bas, la salle des turbines – Source : Wikipedia.

<sup>10</sup> Une autre branche de Thomson Houston sera invitée en 1894 à s'implanter en France à l'initiative du président de la Société française des électriciens, qui, bien que disposant de brevets portant sur le courant continu, voyait tout l'intérêt du courant alternatif et des brevets associés de Thomson Houston pour en assurer le développement en France (cela conduira à utiliser ce courant pour alimenter la première ligne du métro parisien inaugurée en 1900 lors de l'Exposition universelle). Cette implantation sur le territoire français donnera lieu à la création de plusieurs autres sociétés : Alstom, puis Alstom pour les courants forts ; Thomson Brant pour l'électroménager ; Thomson pour les courants faibles ; TMM, puis Technicolor pour le multimédia et, enfin, Thales.

<sup>11</sup> Ironie du sort, les récents progrès de l'électronique de puissance permettent désormais de construire des convertisseurs capables d'élever ou d'abaisser facilement la tension d'un courant continu : si bien qu'aujourd'hui, une ligne de haute tension de courant continu enregistre moins de pertes qu'une ligne de courant alternatif, dont les pertes sont dues aux capacités et aux inductances du câble. La construction de fermes solaires et de fermes éoliennes ainsi que le stockage d'énergie dans les batteries électriques relancent aujourd'hui l'intérêt pour les réseaux de distribution de courant continu.

Mais cette concurrence acerbe fut néfaste pour Tesla. La société Westinghouse était au bord de la faillite. Sous la pression d'investisseurs, notamment de J. P. Morgan, Westinghouse demanda à Tesla de renoncer à ses royalties afin d'empêcher sa perte de contrôle sur la société créée conjointement<sup>12</sup>. Tesla accepta et déchira le contrat qui lui accordait un dollar de royalties pour chaque cheval-puissance d'électricité vendue, ce qui lui aurait assuré une fortune gigantesque.

## Développements ultérieurs

Dans le même temps, Mikhaïl Dolivo-Dobrovolsky, qui travaille à Berlin pour la société AEG, met au point des systèmes de transmission du courant alternatif triphasé, lequel est toujours utilisé aujourd'hui<sup>13</sup>. Ces systèmes sont constitués de quatre lignes de transmission : trois portant des courants dont les phases sont décalées de 120 degrés l'une par rapport à l'autre, et une ligne commune, le neutre<sup>14</sup>.

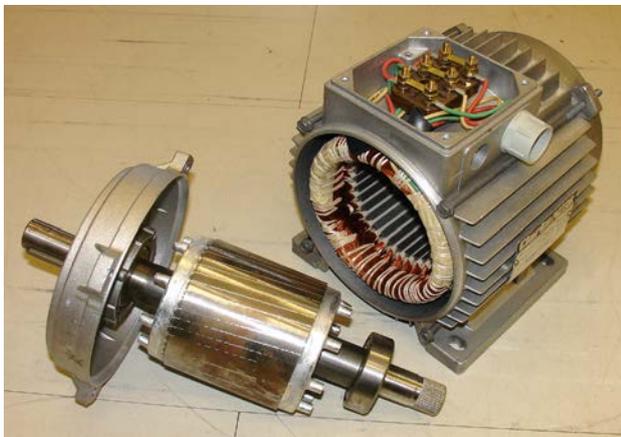


Figure 16 : Le rotor et le stator du moteur dit « cage d'écureuil » – Source : WikiCommons.

<sup>12</sup> Le même J. P. Morgan avait contraint Edison à céder le contrôle de sa société. En fait, Morgan avait financé à la fois le projet d'Edison et celui de Westinghouse. Peu lui importait lequel des deux s'imposerait, son seul souci était de s'assurer le monopole de l'électrification aux États-Unis et d'éliminer ainsi toute concurrence. Morgan avait déjà appliqué cette stratégie avec succès dans les secteurs des chemins de fer, de l'acier, du fer et du pétrole.

<sup>13</sup> Pour la même puissance transmise, les pertes en ligne d'un réseau triphasé sont réduites de moitié par rapport à un réseau monophasé, ce qui permet de choisir des conducteurs plus fins, et donc d'un poids plus faible et de coûts moindres permettant de réaliser une économie de l'ordre de 25 %.

<sup>14</sup> Ainsi, dans le cas d'un moteur électrique triphasé, la charge est équilibrée sur les trois lignes où circulent des courants de valeur absolue identique, décalés entre eux de 120 degrés ; leur somme algébrique est nulle. En revanche, lorsqu'un appareil n'est pas alimenté par des courants identiques sur chacune des phases, il apparaît un courant résiduel qui doit être évacué *via* le conducteur neutre. C'est également le cas des installations domestiques de puissance, dont l'alimentation électrique est triphasée et qui servent au fonctionnement de divers équipements consommateurs monophasés (lave-linge, four électrique, plaque électrique...).

À cette occasion, Dolivo-Dobrovolsky invente le moteur alternatif triphasé, dit « cage d'écureuil »<sup>15</sup>, qui va connaître par la suite une large utilisation, notamment dans des applications industrielles<sup>16</sup>.

Les moteurs électriques décrits auparavant sont tous des machines tournantes : ils disposent d'une partie fixe, le stator, et d'une partie tournante, le rotor, qui effectue un mouvement de rotation. Cependant, dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, sont inventés les moteurs linéaires<sup>17</sup>, qui seront par la suite utilisés dans les processus d'automation industrielle ou comme moyen de propulsion pour les trains à sustentation magnétique, comme le Maglev.

Ainsi, en 1902, Alfred Zehden dépose un brevet concernant un « système de traction électrique avec utilisation d'un champ mobile » ; c'est l'idée du moteur à induction linéaire qui est ainsi traduite. Les premiers prototypes sont construits en 1935 par Hermann Kemper en Allemagne et en 1940 par Eric Laithwaite au Royaume-Uni. Ce dernier met au point un système simple et ingénieux de sustentation magnétique, qui est composé d'une plaque conductrice posée sur un moteur à induction linéaire à courant alternatif, dont les électroaimants sont en forme de U. Le flux magnétique transversal et la géométrie de la plaque assurent la sustentation, la stabilité et la propulsion du prototype.

La découverte de la supraconductivité – c'est-à-dire la perte totale de leur résistance électrique par certains matériaux soumis à des basses températures –, a permis le développement d'électroaimants capables de produire de forts champs magnétiques, une spécificité ayant des applications en matière ferroviaire, à l'instar du train à grande vitesse SCMaglev, qui peut atteindre les 600 km/h. Une fois chargés par le courant d'excitation et refroidis à 4,5°K, les aimants supraconducteurs à base de niobium-titane embarqués dans le train maintiennent en permanence un courant continu circulant et génèrent, en conséquence, un champ magnétique intense n'affichant aucune perte. Néanmoins, est consommée une grande quantité d'énergie pour maintenir les basses températures nécessaires à la conservation de l'état supraconducteur. Le train est propulsé par des bobines électromagnétiques situées dans le rail de guidage, dont la polarité est commandée au fur et à mesure que le train avance, afin de garder toujours

<sup>15</sup> Son rotor est formé par des barres conductrices reliées par des anneaux de court-circuit, qui ressemblent à une cage d'écureuil entourant un noyau en fer. Le champ magnétique engendré par le stator induit une tension électromotrice dans les barres précitées, ce qui génère un courant électrique. Ce courant électrique interagit avec le champ magnétique du stator et donne ainsi naissance à un couple qui fait tourner le rotor.

<sup>16</sup> Le moteur triphasé consomme une puissance instantanée constante, il n'est alors pas soumis aux vibrations qui sont une caractéristique de ses homologues monophasés.

<sup>17</sup> C'est un moteur où le stator et le rotor ont été « déroulés » : donc, au lieu d'engendrer un couple, il génère une force linéaire sur toute sa longueur. Les moteurs linéaires ne sont pas nécessairement droits : en effet, leur section active a des extrémités, alors que celle des machines tournantes est disposée en boucle continue.

une force dirigée dans le sens du mouvement. D'autres bobines, d'une forme particulière et astucieusement connectées, assurent la sustentation et la stabilité du train.

Le moteur linéaire a également des applications militaires, notamment pour équiper le canon électromagnétique qui est capable de propulser des projectiles à des vitesses bien supérieures à celle des canons à poudre conventionnels.

## Conclusion

Des premières expériences d'électromagnétisme réalisées dans les laboratoires avant de passer aux premiers

prototypes fonctionnels, puis aux applications commerciales, le moteur électrique a connu une histoire mouvementée. Son arrivée sur le marché s'est heurtée au problème de sa source d'alimentation ; un problème qui n'a été résolu qu'avec l'invention du générateur électrique, qui n'est en fait qu'un moteur électrique dont le fonctionnement est inversé : transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique. Mais ce sont surtout d'autres applications électriques (la galvanoplastie, le télégraphe, l'éclairage à l'arc électrique, la signalisation navale...) qui ont stimulé l'amélioration du générateur électrique et qui, par la suite, avec la mise en place du réseau de transport électrique, ont permis d'offrir des débouchés commerciaux au moteur électrique.

## Deux exemples d'application du moteur électrique

### • L'automobile électrique

Le développement du moteur électrique est étroitement lié à ses applications dans le domaine du transport. C'est l'invention de la batterie au plomb, par Gaston Planté en 1859, puis les améliorations apportées par Camille Alphonse Faure qui ont permis son industrialisation et apporter ainsi une solution pour que les véhicules puissent disposer d'une source d'énergie rechargeable offrant une autonomie suffisante.

En 1881, Gustave Trouvé équipe un tricycle d'un moteur électrique alimenté par une batterie au plomb ; il invente ainsi le premier véhicule électrique. Quelques années plus tard, l'anglais Thomas Parker construit plusieurs prototypes d'automobiles électriques et fonde une société qui va construire des tramways électriques.

Au début des années 1900, l'automobile électrique se trouvait en concurrence avec l'automobile à vapeur et l'automobile à essence. Mais l'automobile à vapeur demandait quelques dizaines de minutes avant de pouvoir démarrer, le temps de faire monter la vapeur en pression. L'automobile à essence souffrait de handicaps en termes de bruit (lié aux vibrations) et d'odeur (celle du carburant) ; il nécessitait en outre le recours à une manivelle pour son démarrage.

Pour sa part, l'automobile électrique détenait le record de vitesse : ainsi, la « Jamais Contente » de Camille Jenatzy avait franchi la barre des 100 km/h. L'automobile électrique présentait par ailleurs d'autres grands avantages par rapport à ses concurrentes ; elle allait donc connaître un succès commercial : à Londres et à New York, elle était utilisée comme taxi.



Figure 17 : À gauche, l'automobile électrique construite par Thomas Parker. À droite, la « Jamais Contente », qui a franchi la barre des 100 km/h – Source : Wikipedia.

En revanche, l'amélioration des routes et sa conséquence, l'allongement des distances parcourues, ont créé un besoin de véhicules disposant d'une plus grande autonomie, ce que l'automobile électrique n'était plus en mesure d'assurer. Puis, dans le domaine de l'automobile à essence, sont inventés tout d'abord le démarreur électrique, qui met fin au pénible exercice du démarrage à la manivelle, puis le pot à échappement, qui réduit considérablement le bruit. La production de masse mise en place par Henry Ford diminue le prix de l'automobile (la Ford T est vendue à compter de 1908 à un prix plus abordable), le développement de l'exploitation pétrolière rend celle-ci moins chère. C'est ainsi que le véhicule à essence s'impose et devient dominant à compter de 1911.

L'intérêt pour les véhicules électriques renaît dans les années 1970 et 1980, à la suite des premiers chocs pétroliers et, plus récemment, dans le but de limiter les émissions de CO<sub>2</sub> responsables du réchauffement climatique. Plus récemment encore, l'automobile électrique bénéficie de la mise au point de nouvelles batteries, à base de Li-ion, lesquelles sont capables de fournir une densité d'énergie plus importante, et donc une plus grande autonomie. Le 27 octobre 2022, le Conseil de l'UE entérine une volonté politique de remplacer les véhicules thermiques par des véhicules électriques, dont seule la vente sera autorisée à compter de 2035.

### • Le tramway électrique

Les premiers tramways étaient tractés par des chevaux ; ils se sont développés pour assurer le transport des passagers. Par rapport aux omnibus – des voitures sur roues tractées par des chevaux et circulant sur une chaussée pavée –, le tramway, qui roulait sur des rails en fer, présentait une faible résistance au roulement, ce qui lui permettait de transporter des charges plus importantes, tout en générant moins de secousses et en étant moins sensible aux intempéries (la pluie ou la neige).

Cependant, la traction animale nécessitait l'entretien d'un important cheptel de chevaux (hébergement, nourriture et soins), ce qui augmentait les coûts d'exploitation. On chercha alors à trouver des systèmes de propulsion plus économiques : le moteur à vapeur, la traction par câble, le moteur électrique.

Le moteur à vapeur nécessitait un certain temps avant son démarrage (comme évoqué précédemment, le temps de faire monter la pression de la vapeur). Il générait trop de bruit et émettait trop de fumée pour une utilisation en ville. Pour en limiter le bruit, on a confiné les roues et les parties mouvantes. Pour en réduire la fumée, on a utilisé le coke comme combustible et installé des condenseurs servant à capter la vapeur d'eau. Mais le tramway, dont la taille était inférieure à celle d'une locomotive sur rail, ne pouvait accueillir que des petits moteurs à vapeur ; sa puissance était donc limitée.

Les tramways à traction par câble impliquaient des coûts d'infrastructures élevés, car il fallait installer tout un système complexe de câbles, de poulies et de moteurs. Il fallait en outre creuser des canaux sous les rails pour y loger le câble. Le système nécessitait également beaucoup de maintenance, car le câble s'usait et devait donc être remplacé : une maintenance essentielle, car une rupture du câble entraînait l'arrêt complet de toute la ligne. De plus, les conducteurs de ces tramways devaient faire preuve d'une grande adresse pour réussir à lâcher le câble lors de l'arrêt du tram et à le récupérer lors du démarrage. Néanmoins, les tramways tirés par des câbles sont restés adaptés aux villes construites sur des collines ou sur des terrains escarpés, qu'il faut monter et descendre à vitesse constante. C'est notamment le cas de la ville de San Francisco.

Dans les faits, le tramway électrique s'est avéré être le système le plus économique. La première démonstration d'un tel tramway eut lieu en 1875, à Saint-Pétersbourg, par Fyodor Pirotsky. Les rails du tramway étaient isolés par rapport au sol et servaient comme conducteurs de l'alimentation électrique. Le premier succès commercial est celui enregistré par Carl von Siemens en 1881, à Lichterfelde, près de Berlin. Plus tard, il mettra au point une alimentation électrique par fil aérien, afin d'éviter les accidents d'électrocution liés à une alimentation exclusivement par les rails. Plusieurs lignes sont alors ouvertes au Royaume-Uni et au Canada. Mais c'est Frank Sprague, qui, aux États-Unis, améliore le système d'alimentation électrique en utilisant une roue pour permettre le glissement de la perche d'alimentation du tramway sur le fil électrique. Sprague met aussi au point le freinage régénératif et un système de contrôle permettant de coupler ensemble plusieurs voitures motrices. Ces inventions ont permis une adoption rapide du tramway électrique : plusieurs métropoles vont ainsi s'équiper de ce moyen de transport, une adoption d'autant plus rapide qu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, les problèmes

de production, de transport et de distribution de l'énergie électrique sont en train d'être résolus. En France, un des premiers tramways à être mis en service sera celui de Versailles : inauguré en 1876, il sera en fonctionnement jusqu'en 1957. Il ne sera électrifié qu'en 1896.

Les tramways électriques disparurent progressivement dans un espace de temps allant des années 1930 jusqu'à la fin des années 1960. Les améliorations du moteur à combustion en termes de vitesse, de fiabilité et de facilité d'exploitation rendirent les bus plus économiques, et ce d'autant plus qu'ils peuvent rouler sur les routes et n'ont donc pas besoin d'infrastructures particulières. Le développement des voitures particulières, vu comme un signe de modernité, a accéléré la disparition du tramway dans un grand nombre de villes. Ainsi, dans les années 1940, aux États-Unis, plusieurs sociétés du secteur de l'automobile ou du pétrole, comme General Motors, Firestone ou Standard Oil, ont acheté les sociétés de tramways pour faciliter la fermeture des lignes qu'elles exploitaient.

Mais cette priorité accordée aux véhicules personnels a conduit à la congestion du trafic, au développement de la pollution sonore, des émissions nocives et à un problème de stationnement (insuffisance des places de parking face à l'essor des véhicules individuels). Dès lors, dès les années 1980, le transport en commun par tramway électrique a suscité à nouveau un certain intérêt. Il est particulièrement adapté dans des villes où la construction du métro demande un investissement trop important ou reste difficile en raison de la nature du sol, de l'existence de nappes d'eau souterraine ou de vestiges archéologiques.