



HAL
open science

Historique des machines électriques et plus particulièrement des machines à réluctance variable

Bernard Multon

► **To cite this version:**

Bernard Multon. Historique des machines électriques et plus particulièrement des machines à réluctance variable. La Revue 3E.I, 1995, pp.3-8. hal-00674038

HAL Id: hal-00674038

<https://hal.science/hal-00674038>

Submitted on 24 Feb 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

HISTORIQUE DES MACHINES ÉLECTROMAGNÉTIQUES ET PLUS PARTICULIÈREMENT DES MACHINES À RÉLUCTANCE VARIABLE

Bernard MULTON

LÉSIR (URA CNRS D1375), École Normale Supérieure de Cachan

Le texte de cet article correspond partiellement à un extrait du rapport d'habilitation à diriger des recherches de l'auteur (17 mai 1994).

1- INTRODUCTION

Après avoir passé un certain nombre d'années à travailler à comprendre le fonctionnement des machines électriques, il m'est apparu nécessaire, afin de contribuer à leur amélioration, de mieux connaître l'histoire de l'électrotechnique et, plus particulièrement, celle des machines électriques. Aussi, je souhaiterais relater quelques-unes des principales étapes de cette aventure, en l'orientant, plus spécifiquement, vers les machines à réluctance variable. Si la présentation qui suit reste anecdotique, son traitement n'en est pas moins délicat : en effet, bien que cette histoire soit relativement récente, il y règne quelques incertitudes que les épistémologues ne sont pas toujours parvenus à éclaircir. Si certaines relèvent de l'anecdote ou de la pure polémique, comme la question de la paternité de l'invention de l'induit en anneau de la machine à courant continu de Zénobe **GRAMME**, d'autres sont de caractère plus scientifique. Ainsi, pour certains, les premiers moteurs électriques effectifs (le moteur électromagnétique **DE JACOBI** inventé en 1834, par exemple) utilisaient l'attraction de pièces en fer doux par des électroaimants (à réluctance variable pure) [1, 2], alors que pour d'autres, il s'agissait de moteurs mettant en œuvre l'attraction puis la répulsion d'électroaimants inducteurs (ou encore d'aimants permanents) par d'autres électroaimants (dispositif d'induit). En fait, il semble que Jacobi ait réalisé successivement les deux types de moteurs [28], découvrant ainsi les vertus de l'excitation directe de l'inducteur (en comparaison avec l'inducteur "passif" des moteurs à réluctance pure).

Ce bref rappel historique nous conduira aussi à prendre conscience, le recul aidant, de la modeste contribution du laborieux travail produit par le "scientifique moyen". Les machines électriques (nous devrions dire électromagnétiques pour être plus précis : nous avons, en effet, fini par occulter les nombreux principes de conversion électromécanique qui réémergent actuellement !) ont à ce jour plus de 150 ans. L'essentiel de leur théorie (machines à courant continu à collecteur, synchrones et asynchrones) est bien assis depuis plus de 90 ans [3]. Il existait alors une certaine "philosophie" de leur enseignement que l'on peut encore prendre en modèle aujourd'hui ! Et pourtant, grâce aux avancées continues des matériaux [9, 10] et, plus récemment, à l'électronique de puissance (thyristors années 1960, transistors de puissance années 1970), aux moyens puissants de contrôle (microprocesseurs..., années 1970) et, à l'ingéniosité des chercheurs et des ingénieurs, de grands progrès ont été accomplis quant aux performances, mais toujours à petits pas !

L'aventure de l'électricité –et de la physique d'ailleurs– commence, d'après les historiens [1, 8, 30, 32], aux alentours de 585 av. J.C., avec les travaux du philosophe grec **THALÈS** de Millet (Grèce Ionienne), lors de l'étude sur l'attraction des corps

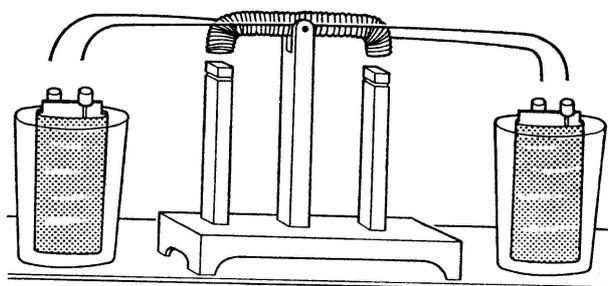
légers par l'ambre frotté (le nom "électron" – $\epsilon\lambda\epsilon\chi\rho\nu$ – signifiant, en grec, ambre). Après une longue période d'oubli, mais probablement non passive (le français Pierre **DE MARICOURT** publie en 1269 sa "Lettre sur les aimants" [32]), le médecin de la reine d'Angleterre William **GILBERT** publie, en 1600, un remarquable ouvrage sur les observations des propriétés des aimants et de l'électricité statique : "*De magnet*". Il considère alors que l'ambre électrisé est une variété d'aimant, c'est peut-être la première fois qu'électricité et magnétisme sont autant rapprochés. Puis, en 1660, en Allemagne à Magdebourg, Otto **VON GUERICKE** "invente" la génératrice électrostatique ; il s'agit sans doute de la première machine électrique, dont toutefois la réversibilité ne semble pas avoir été imaginée. Jusque là, les travaux effectués ne concernaient que l'électrostatique. L'étude expérimentale des phénomènes électriques et magnétiques (traités indépendamment) va connaître durant le XVIII^e siècle un développement prodigieux. En 1733, Charles-François **DE CISTERNAY DU FAY** découvre la polarité de l'électricité statique. Citons deux autres acteurs importants de cette phase : l'abbé Jean-Antoine **NOLLET** [29] et l'Américain Benjamin **FRANKLIN** [30]. Tous deux s'intéressèrent à la foudre et à l'électricité ; ils découvrirent que la foudre était une décharge électrique identique à celles qu'ils savaient produire durant leurs expériences. Ils firent aussi, tous deux, une découverte fondamentale, sans cependant y prêter attention. Ils observèrent une relation entre électricité et magnétisme : ils remarquèrent, en effet, que la foudre pouvait démagnétiser les aimants ou inverser leur polarité [29]. **FRANKLIN** réalisa même l'expérience avec de l'électricité "artificielle" [30]. Les inventions électrotechniques (ce mot n'était pas usité à cette époque, il n'est apparu que vers 1892 [8]) vont alors se succéder : en 1745, la bouteille de Leyde (ville des Pays-Bas, son inventeur est **MUSSCHENBROEK**) –premier condensateur–, la première pile de l'Italien Alexandre **VOLTA** en 1799. Cette dernière découverte sera à l'origine des premières applications industrielles de l'électricité : l'électrolyse. Cependant les piles étaient très coûteuses et dégageaient des "vapeurs" désagréables et nocives [1]. Les premières machines électriques à vocation industrielle seront des génératrices vouées au remplacement des générateurs électrochimiques. Remarque importante, l'énergie électrique, au début du XIX^e siècle, n'est disponible qu'en courant continu.

2- GENÈSE DES MACHINES ÉLECTROMAGNÉTIQUES (XIX^e siècle)

L'histoire des machines électromagnétiques débute véritablement à la fin de 1819, à Copenhague, par la mise en évidence de l'action à distance de la circulation d'un courant électrique sur une aiguille aimantée. Rappelons que l'Abbé **NOLLET** ainsi que **FRANKLIN** avaient remarqué qu'un courant

électrique pouvait magnétiser ou démagnétiser les aimants environ 80 ans auparavant ; ils n'avaient, cependant, pas eu la chance de voir une aiguille de boussole se mouvoir lorsqu'ils produisaient des décharges électriques. Malgré tout, les très nombreuses expériences réalisées un peu partout en Europe et en Amérique au XVIII^e siècle ont constitué les germes de la révolution de l'électricité du XIX^e siècle. L'expérience, effectuée par le Danois Hans-Christian **OERSTED** allait susciter, lors de la publication de ses résultats en juillet 1820, une intense activité de recherche dans le monde entier. Ainsi, dès septembre 1820, le Français André-Marie **AMPÈRE** énonce la "règle du bonhomme d'Ampère" ; en novembre 1820, Dominique François **ARAGO** annonce qu'il a réussi à aimanter un morceau de fer avec un solénoïde ; c'est aussi à cette époque qu'en Angleterre, Humphrey **DAVY** fait la même découverte : le principe de l'électroaimant était établi ...

Désormais, du fait de cette rapidité d'évolution et de l'engouement de tous, il sera de plus en plus difficile d'attribuer, à tel ou tel, toute découverte ou invention nouvelle. Ces réserves faites, nous donnerons toutefois des noms et des dates. En 1821, l'Anglais Michael **FARADAY** réalise le premier moteur électromagnétique ; en 1822, Peter **BARLOW** lui adjoint une roue dentée. C'est sous le nom de "roue de BARLOW" que cette machine est connue en France (les Anglo-Saxons la nomment "moteur de FARADAY"). Rappelons toutefois que ce premier moteur était inapte à toute application industrielle et qu'il n'a jamais tourné que sur les tables de démonstration des laboratoires et des salles de cours. En 1831, FARADAY énonce les principes de l'induction électromagnétique ; pendant cette période, le Russe Friedrich Emil **LENZ** et l'Américain Joseph **HENRY** ont, de leur côté, effectué des travaux similaires contribuant ainsi à la découverte et à la compréhension de ce phénomène.



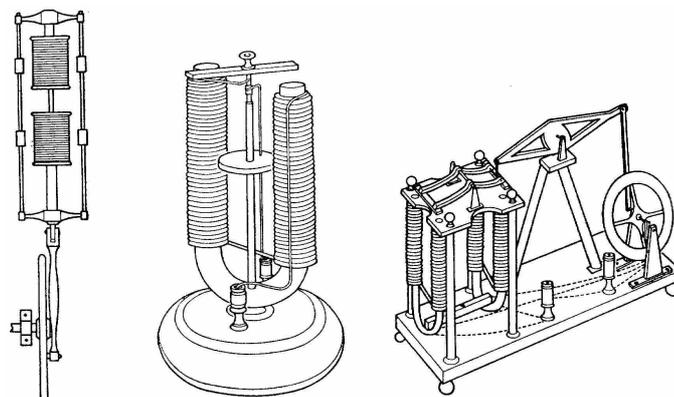
"Moteur" électromagnétique de Joseph HENRY : 1831
Figure -1-

En 1831, tous les principes qui allaient permettre de réaliser les moteurs électromagnétiques se trouvaient donc établis. HENRY conçut alors, cette année là, un électro-aimant qui, alimenté par une pile, pouvait soulever 50 fois son propre poids. Il construisit aussi un "actionneur" de laboratoire [4] (figure) qui peut être considéré comme l'ancêtre des moteurs à réluctance variable. Les oscillations verticales connectent alternativement les 2 bobinages aux bornes des 2 piles placées de part et d'autre de l'appareil [4].

En 1832, AMPÈRE fait réaliser, par le constructeur français Hippolyte **PIXII**, la "première" génératrice à courant continu : il s'agit en fait d'une machine comprenant un aimant tournant entraîné par une manivelle et deux bobines fixes dans lesquelles sont induites des tensions alternatives ; celles-ci devant être redressées pour délivrer un courant continu, un redresseur

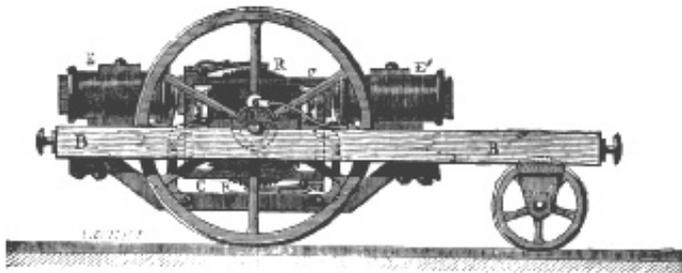
mécanique est inventé pour l'occasion. De son côté, en 1836, l'Anglais Hyde **CLARKE** conçoit une machine dont la structure est inversée par rapport à celle de PIXII/AMPÈRE ; ceci permet d'avoir un commutateur redresseur entraîné directement par l'arbre. On peut dire qu'il s'agit là de l'ancêtre de la machine à courant continu. Toutes ces machines génératrices d'électricité posent toutefois le problème fondamental de la commutation mécanique de courants inductifs ! De nombreux chercheurs travaillent à cette amélioration : l'Allemand Werner von **SIEMENS** construit peu avant 1856 une magnéto (ce terme est employé lorsque le champ inducteur est généré par un aimant permanent) dans laquelle le rotor est un cylindre en fer doux comportant un bobinage en forme de navette [8] ; en 1856, l'inducteur devient un électro-aimant. En 1865, l'Italien Antonio **PACCINOTTI** [2, 4, 8] construit un prototype de machine à courant continu à induit en anneau et collecteur radial dont le fonctionnement est très amélioré, cependant ses travaux passent inaperçus. C'est seulement en 1869 que le célèbre Belge Zénobe **GRAMME**, employé de la compagnie française "l'Alliance" spécialisée dans la fabrication de génératrices de "courant continu", dépose un brevet sur l'induit en anneau que PACCINOTTI avait inventé auparavant et qu'il tenta vainement de contester. Tels sont les débuts, très résumés, de l'histoire de la machine à courant continu. La même année (1969), James-Clark **MAXWELL**, élève et continuateur de FARADAY, publie sa théorie unifiée des phénomènes électromagnétiques.

Mais, bien avant que la machine à courant continu n'arrive à maturité et surtout qu'elle n'occupe une place très importante parmi les machines électromagnétiques tant comme moteur que comme génératrice, bien d'autres structures furent inventées, leur exploitation connaissant des fortunes diverses. De nombreuses machines que nous dirions aujourd'hui "à réluctance variable" furent proposées. Parmi les inventeurs, citons le savant physicien russe **DE JACOBI** [1, 21] qui, dans un rapport qu'il présenta à l'académie des sciences de Saint Pétersbourg en 1834, proposa d'appliquer l'électromagnétisme aux machines et décrivit une structure tournante à réluctance variable. Citons aussi le professeur et physicien américain Charles Grafton **PAGE** qui réalisa [4, 17] plusieurs dispositions originales "à fer tournant" entre 1835 et 1840. La figure 2 (issue de [4]) montre trois moteurs de PAGE. On remarquera que les courants des bobines étaient commutés par des interrupteurs mécaniques en synchronisme avec le mouvement ; il s'agissait, pour employer un terme contemporain, d'un autopilotage.



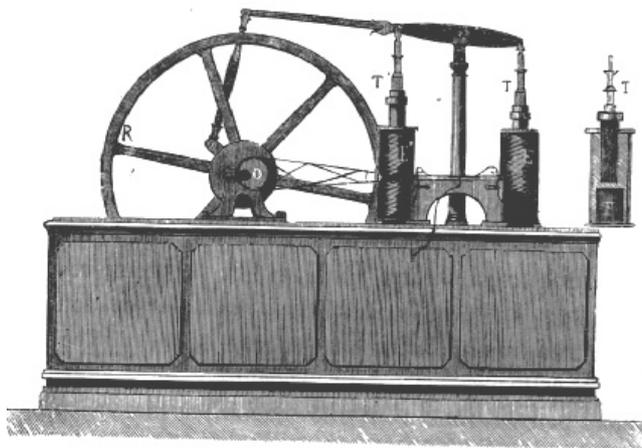
Moteurs de Charles G. PAGE (années 1835 à 1840)
Figure -2-

En France, vers 1840, l'ingénieur **GAIFFE** [1] construit un moteur de démonstration (figure 3), lui aussi autopiloté mécaniquement. Il comportait, d'après ce que les dessins laissent entrevoir, des électro-aimants attirant des noyaux plongeurs et reproduisant ainsi le fonctionnement des moteurs à vapeur à pistons, le mouvement linéaire étant transformé en rotation par un système mécanique.



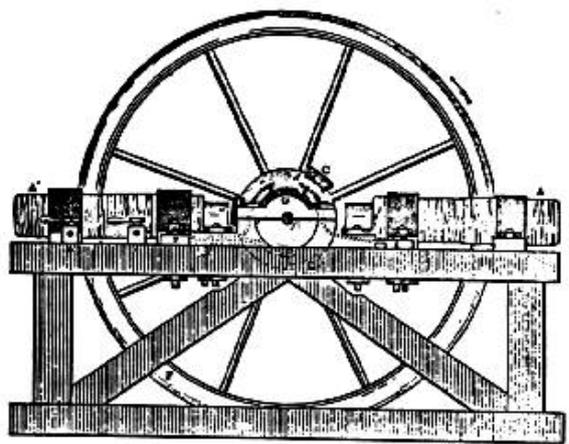
Moteur de GAIFFE (1840 environ)
Figure -3-

D'autres moteurs similaires furent conçus, en 1837, par l'Américain **DAVENPORT** (actionneur de presse d'imprimerie) et par l'Écossais Robert **DAVIDSON** en 1839 pour l'entraînement d'un tour. À cette époque, le Français Gustave **FROMENT**, ancien élève de l'École Polytechnique, réalise un moteur de grandes dimensions [21] constitué de deux électro-aimants. Ce moteur reprenait la disposition des machines à vapeur. La figure 4 en montre la structure : la partie 0 représente le commutateur mécanique excentrique. En 1865, **BOURBOUZE** avait aussi élaboré un moteur électrique à deux noyaux plongeurs [4] dont la structure se rapprochait de celle d'une machine à vapeur à cylindres verticaux.



Moteur à "pistons électromagnétiques" de Gustave FROMENT
Figure -4-

En 1842 **DAVIDSON**, utilise un des premiers moteurs tournants [17] (figure 5) à réluctance variable pour entraîner à 4 miles/heure (soit environ 6 km/h) un véhicule ferroviaire de 6 tonnes entre Edinburgh et Glasgow ; il s'agit sans doute de la première locomotive électrique. D'après [21 et 28], Davidson a équipé une locomotive d'un moteur **PATTERSON** conçu à Paris en 1840. Le stator de ce moteur est constitué de deux électro-aimants en forme de U qui attirent, à tour de rôle, 3 barres situées sur le rotor. Un commutateur mécanique, entraîné par l'axe, réalise la connexion successive des bobines aux batteries.



Moteur de DAVIDSON ou PATTERSON (1842)
Figure -5-

En 1845, Gustave **FROMENT** réalise un moteur tournant performant, ancêtre des moteurs à réluctance variable à double saillance [33]. Ce moteur servait à entraîner des machines à tracer des divisions [1] sur des règles, cadrans, etc.

La figure 6 [4] montre un moteur à 4 phases : on observera la disposition astucieuse des bobines d'une même phase qui permet de minimiser la longueur des trajets du flux dans les circuits de retour. Ce moteur fut utilisé, entre autres applications, pour remonter des poids d'horloge [4] et pour entraîner une meule à chanvre [27].

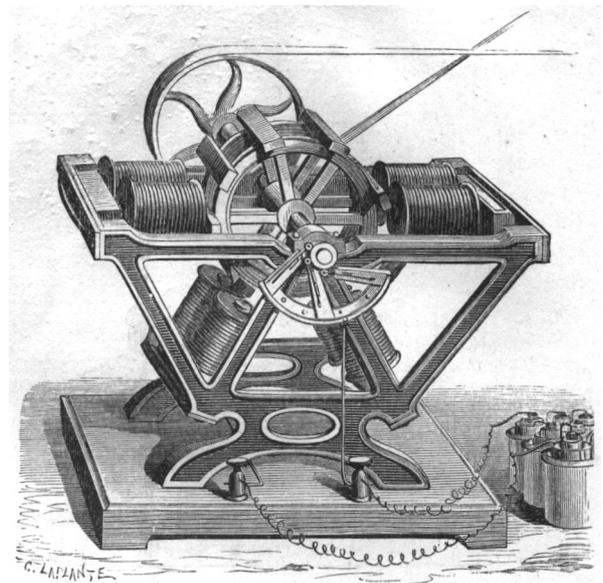


Fig. 54. — Moteur à mouvement de rotation direct, de M. Froment.

Moteur élémentaire de FROMENT (1845)
Figure -6-

La figure 7 présente un autre dispositif plus puissant constitué d'un empilage de 5 structures élémentaires [6, 28] comprenant chacune 4 électro-aimants à deux pôles bobinés ; on remarquera, en haut, le commutateur mécanique permettant l'autopilotage. Le couple de ce moteur atteignait 500 N.m environ. Les moteurs de **FROMENT** furent probablement les premiers à être utilisés pour des applications industrielles. Toutes ces machines à réluctance variable n'ont, semble-t-il, été utilisées que pour des fonctionnements en moteur. Leur apparence "passive" n'a pas laissé immédiatement entrevoir leur réversibilité.

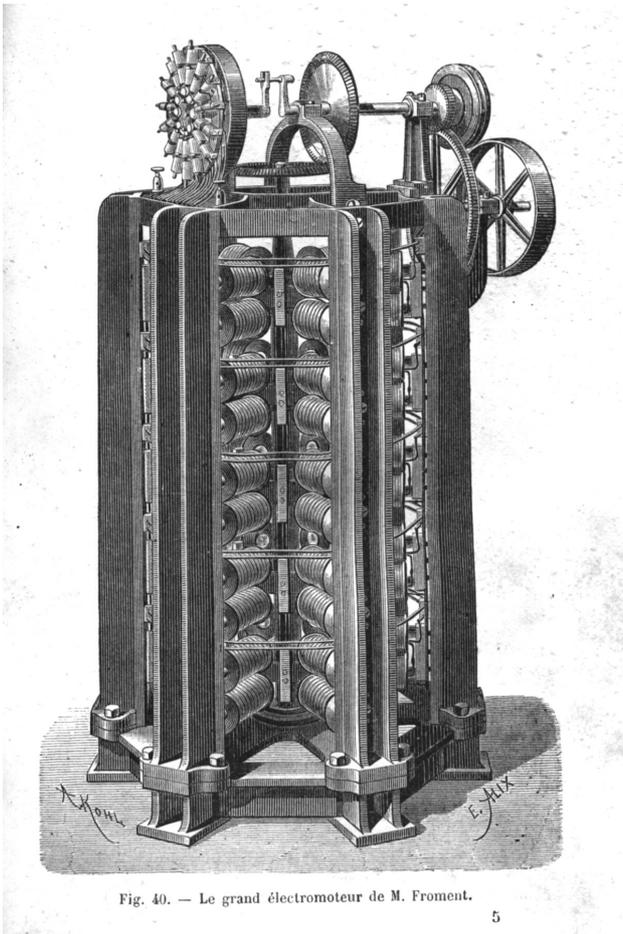


Fig. 40. — Le grand électromoteur de M. Froment.

5

Moteur composé de FROMENT (1848)

Figure -7-

D'autres types de machines furent fabriqués pour constituer des générateurs. À partir de 1860, la compagnie "l'Alliance" fabriquait industriellement des génératrices de structures complexes qui comprenaient, au stator, un grand nombre d'aimants inducteurs en fer à cheval (jusqu'à 80 sur un même bâti) et, au rotor, le même nombre d'électro-aimants induits ; il y avait un nombre double de coquilles redresseuses. Ces engins étaient complexes, bruyants, peu fiables et générateurs d'étincelles [8]. Ce sont, entre autres, ces raisons qui ont poussé GRAMME, employé de la société, à réaliser une meilleure génératrice à courant continu.

Au début des années 1880, de nombreux moteurs à courants alternatifs avaient été mis au point en partant du principe de réversibilité des générateurs précédemment inventés [7] ; l'obstacle majeur résidait dans la difficulté de leur démarrage ou dans la fragilité de leur commutateur mécanique qui s'usait très rapidement [28] à cause des coupures inductives.

Ce fut en 1878, alors qu'il était étudiant à l'école polytechnique de Graz en Autriche, que le Yougoslave Nikola TESLA suggéra, pour la première fois, à ses enseignants que l'on pouvait fabriquer un moteur sans aucun commutateur, ceci pendant qu'il observait une dynamo de GRAMME étincelante [5] ! En 1883, alors employé par Continental Edison (à Paris) et séjournant à Strasbourg, il construisit le "premier" prototype grossier de machine asynchrone. Parallèlement, entre 1879 et 1883 en Italie, Galileo FERRARIS réalisait des expériences sur le sujet et établissait la théorie du champ tournant. Il publia la théorie du moteur asynchrone en 1888 et montra, en particulier,

que le couple était proportionnel au glissement [7]. Pendant ce temps, TESLA partait aux USA pour tirer un meilleur parti de son invention. Là bas, il rencontra Thomas EDISON qui, quant à lui, était un partisan convaincu du courant continu. Aussi, ce dernier embaucha TESLA pour améliorer la commutation des machines à courant continu. En 1888, TESLA déposa quantité de brevets pour tout son système polyphasé (générateurs, transformateurs, moteurs synchrones et asynchrones...), en particulier pour un moteur asynchrone à induit en anneau. Ces brevets furent aussitôt achetés par la société Westinghouse. La même année, la société Westinghouse acheta aussi à FERRARIS sa découverte pour breveter des dispositifs la mettant à profit. A la fin du XIXe siècle, de nombreuses "usines" de production d'électricité en courant continu étaient déjà implantées, en particulier aux USA. Ce fut alors le début de la célèbre lutte entre EDISON et TESLA au sujet du choix courant continu ou alternatif pour la production, l'utilisation et donc la consommation de l'énergie électrique. L'issue de cette polémique est bien connue aujourd'hui ! Le premier moteur asynchrone triphasé [20] fut réalisé par l'Allemand Michael DOLIVO-DOBROWOLSKI en 1889 et, en 1893, il concevait, en même temps que le Français BOUCHEROT, le moteur à double cage.

3- ÉVOLUTIONS DU XX^e SIÈCLE

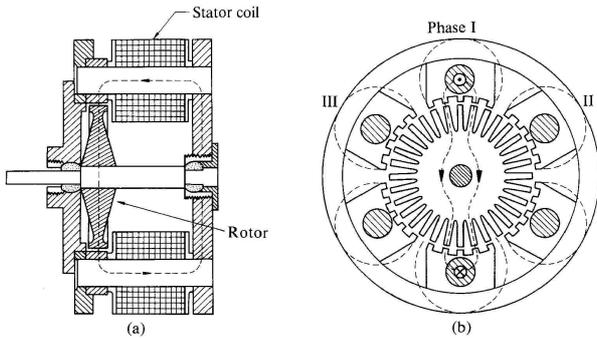
Ces fondements historiques généraux étant établis, nous consacrerons maintenant exclusivement aux moteurs à réluctance variable. Après avoir actionné très probablement les premiers moteurs électromagnétiques, le principe de la réluctance variable est resté très marginal. Il fut surpassé par les machines synchrones permettant la réalisation des plus grands générateurs [9], par les machines asynchrones (seuls moteurs pouvant se mettre en marche sans dispositif auxiliaire et fonctionner sur le réseau alternatif) et par les machines à courant continu à collecteur. Ces dernières possèdent les mêmes qualités sur une alimentation en courant continu et permettent aussi la variation de vitesse la plus aisée et la mieux contrôlable. Notons que le moteur universel (collecteur mécanique et excitation série) permet un fonctionnement identique sur le réseau alternatif.

Si le moteur à réluctance variable, par principe fortement inductif, se trouvait considérablement handicapé par la commutation mécanique de ses courants —celle-ci constituant un facteur évident de limitation de la puissance— il n'a cependant jamais complètement disparu. A cette époque déjà, son intérêt résidait dans ses qualités de simplicité et de robustesse. Ainsi, il a actionné des systèmes d'horlogerie [4] (horloge Froment, 1854), des jouets (petits moteurs Froment monophasés) vers 1900-1910, des dispositifs de transmission électrique [11, 23] (1920, synchro-machines dans les bateaux de guerre), des rasoirs (Remington) ou encore, des tourne-disques 78 tr/mn (moteurs à rotor extérieur construits par les Etablissements Ragonot) [13]. Ces moteurs étaient soit de type pas à pas, soit autopilotés mécaniquement, soit synchrones selon les contraintes de fonctionnement et le principe d'alimentation retenu.

Le principe de réluctance variable a été également choisi pour la génération de courants hautes fréquences (de quelques kHz à 20 kHz) dans l'alimentation de fours à induction et dans l'émission des ondes radio [4]. On bénéficiait, dans ce dernier cas, d'une part, de la facilité d'obtenir un grand nombre de pôles grâce à un rotor denté passif et, d'autre part, de l'absence de collecteur. Les premiers alternateurs "à fer tournant" apparurent dans les

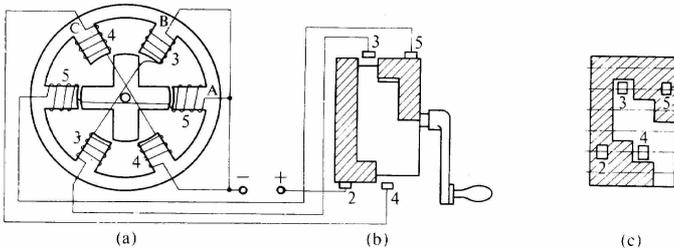
années 1888 ; une structure remarquable, de type homopolaire, fut conçue et commercialisée à cette époque par la société OERLIKON [4], sa puissance était de 70 chevaux. Au XX^e siècle, d'autres alternateurs à réluctance variable, homopolaires [13, 14], ou hétéropolaires (structures de Lorentz-Schmitt et Guy) [26] furent réalisés et utilisés.

Les premiers moteurs pas à pas furent employés, naturellement, dans les systèmes d'horlogerie (années 1850), mais c'est seulement dans les années 1910 qu'ils furent appliqués à des entraînements différents. Une invention originale de l'ingénieur écossais C.L. WALKER fit l'objet d'un dépôt de brevet au Royaume-Uni en 1919 [23]. La structure proposée est présentée à la figure 8.



Moteur pas à pas (32 dents rotoriques) breveté par C.L. WALKER en 1919
Figure -8-

Il semble que les premières structures à double saillance, telles que nous les connaissons aujourd'hui, soient apparues dans les années 1920 [23]. Un article de 1927 sur les applications de l'électricité dans les bateaux de guerre décrit un moteur de type 6/4 pareil à ceux que nous étudions actuellement. Il était utilisé comme transmetteur de mouvement entre deux points éloignés (figure 9).



Un des premiers moteurs à réluctance variable à double saillance (années 1920)
Figure -9-

En ce qui concerne la théorie qui, dans ce domaine, a souvent suivi les premières applications, un article de 1927 [12] décrit le principe physique de la génération d'efforts dans les machines à réluctance variable.

Dans les années 1930, les "moteurs synchrones à pôles saillants non excités" (synchrones à réluctance variable) [24] ont commencé à être étudiés. On avait besoin, pour certaines applications, d'une vitesse précise et constante mais aussi d'un démarrage autonome. Ainsi, le moteur synchrone (à champ tournant) à pôles saillants mais dépourvu d'excitation, à condition qu'il soit muni d'une cage d'écurie de démarrage, pouvait satisfaire à ces exigences. Ces moteurs furent d'un emploi assez restreint car leur facteur de puissance et leur rendement restaient faibles, la structure électromagnétique (stator à pôles lisses et

présence de la cage) ne permettaient pas un rapport de saillance suffisant (grande variation d'inductance). Dans les années 1960, en Angleterre, on s'intéressa de nouveau à ces moteurs [15] ; ce fut probablement le point de départ des travaux des équipes de plusieurs universités anglaises, notamment celles de Leeds (Professeur Peter J. LAWRENSON ...) et Nottingham. Ensuite, sont apparus les moteurs synchrones à réluctance variable à rotor segmenté [18], à barrières de flux et à rotor axialement laminé [19] : ces techniques avaient pour but d'augmenter le rapport de saillance et, par là, le facteur de puissance et les performances. À la même époque, naissait en France, avec les frères JARRET, un nouvel engouement pour les moteurs à réluctance variable Vernier à grand nombre de dents et fort couple massique [16] : ces moteurs semblaient particulièrement adaptés à la réalisation d'entraînements directs à basse vitesse, par exemple, pour des roues de véhicules électriques... Quant au moteur à réluctance variable à double saillance autocommuté, le terme équivalent anglo-saxon : "Switched Reluctance Motor" semble être apparu en 1969 [31] ; c'est aujourd'hui le terme employé dans la littérature scientifique internationale pour qualifier ces machines. Plusieurs laboratoires universitaires français, dont le LÉSiR, ont travaillé récemment dans le domaine des machines à réluctance variable à double saillance à alimentation électronique. En 1994, plusieurs industriels en commercialisent, ce sont Allenwest Ltd. au Royaume Uni, Sicme-Motori en Italie. Les applications envisagées aujourd'hui sont les entraînements industriels à vitesse variable, et celles potentielles sont certains accessoires automobiles et électroménagers, les démarreurs-alternateurs de turbines (aéronautiques)...

Notons enfin, que, durant ce siècle, les performances des machines électriques se sont considérablement améliorées grâce aux progrès des matériaux (surtout isolants et magnétiques), à une meilleure optimisation permise par l'accroissement des moyens de calcul et, enfin, par l'utilisation de fréquences plus élevées (électronique de puissance).

4- RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] *L'étincelle électrique, son histoire, ses applications*, Paul LAURANCIN, Librairie d'Education, PARIS 1870 (environ), 228 p., 103 gravures, Chapitres XIII (La mécanique électrique ou l'électricité mécanicienne) et XIV (Transformation du mouvement en électricité).

[2] *La science, ses progrès, ses applications*, 2 tomes, publiés sous la direction de G. URBAIN et M. DOLL, Librairie Larousse, PARIS 1933, 808 p. 2360 gravures, Chapitre VIII (L'électricité et le magnétisme) pp. 283-320.

[3] *Electromoteurs*, G. ROESSLER, traduit de l'allemand par E. SAMITCA, Dunod 1902, tome 1 : courant continu 152 p., tome 2 : courants alternatifs et triphasés 235 p.

[4] *Histoire générale des techniques*, publiée sous la direction de M. DUMAS, Presses Universitaires de France.
Tome III : "L'expansion du machinisme", les appareils de l'industrie de construction électrique, pp. 435-436, 1968.
Tome IV : "Les techniques de la civilisation industrielle. Energie et matériaux" 1978.

- [5] ***L'aventure de l'électricité***,
Louis LEPRINCE-RINGUET,
l'Odyssee-Flammarion, 1983.
- [6] ***La fée électricité***,
Alain BELTRAN,
Découvertes Gallimard, sciences et techniques, 1991.
- [7] ***Histoire de l'électricité en France***,
sous la direction de François CARON et Fabienne CARDOT,
Tome premier 1881-1918, 12 auteurs, 999 p., FAYARD, 1991.
- [8] ***"L'électrotechnique : des premiers balbutiements à l'âge mûr ou la croissance d'une alerte septuagénaire (1832 - 1906)"***,
Robert BONNEFILLE, article non daté.
- [9] ***Matériaux (tome 1) : Propriétés et applications***,
M.F. ASHBY, D.R.H. JONES, Pergamon Press, 1980,
traduit de l'anglais par Yves BRECHET, Joël COURBON, Michel DUPREUX, Dunod 1991.
- [10] ***"Evolution of the Synchronous Machine"***,
G. J. NEIDHOFER,
SM100 Zürich, August 1991, part II, pp. A1-A6.
- [11] ***Les actionneurs électriques pas à pas***,
Michel KANT,
Traité des nouvelles technologies, série automatique, Hermès 1989.
- [12] ***"Mechanical Forces between Electric Current and Saturated Magnetic Fields"***,
KARAPETOFF,
IEE Trans. 46, 1927, pp. 563-569.
- [13] ***Machines synchrones***,
A. GUILBERT,
Dunod 1965, pp. 76-99 (Alternateurs à réluctance variable).
- [14] ***"Les convertisseurs rotatifs à moyenne fréquence"***,
A. BAFFREY,
RGE tome 74, n°11 (novembre 1965), pp. 904-911.
- [15] ***"Theory and Performance of Polyphase Reluctance Machines"***,
P.J. LAWRENSON,
proc. IEE, Vol.111, August 1964, pp. 1435-1445.
- [16] ***"Machines électriques à réluctance variable à dents saturées"***,
J. BAJER,
La technique moderne, février 1967.
- [17] ***"Discussion on «Variable-Speed Switched Reluctance Motors»"***,
M.R. HARRIS, H.R. BOLTON, P.A. WARD, J.V. BYRNE,
G.B. SMITH, J. MERRETT, F. DEVITT, R.J.A. PAUL,
K.K. SCHWARTZ, M.F. MANGAN, A.F. ANDERSON,
R. BOURNE, P.J. LAWRENSON, J.M. STEPHENSON,
N.N. FULTON,
proc. IEE, Vol 128, Pt.B, N°5, September 1981, pp. 260-276.
- [18] ***"Development in the Performance and Theory of Segmental Rotor Reluctance Machines"***,
P.J. LAWRENSON, AGU,
proc.IEE, Vol 114, May 1967, pp. 645-653.
- [19] ***"Axially Laminated Anisotropic Rotors for Reluctance Motors"***,
A.J.O. CRUICKSHANK, R.W. MENZIES,
proc. IEE, Vol.113, 1966, pp.2058-2060.
- [20] ***Fundamentos de maquinas electricas rotativas***,
Luis Serrano IRIBARNEGARAY,
Universidad Politecnica de Valencia, Marcombo Boixareu Editores 1989.
- [21] ***Tout par l'électricité***,
Georges DARIS,
A. MAME & fils éditeurs, 1883 (deuxième édition).
- [22] ***Brevets d'invention français 1791-1902***,
Ministère de l'Industrie et du Commerce, Paris 1958.
- [23] ***Stepping Motors and their Microprocessor Controls***,
Takashi KENJO,
Oxford Science Publications, 1992 (première édition : 1984).
- [24] ***Les moteurs électriques à puissance fractionnaire***,
Cyril G. VEINOTT (Westinghouse Electric Corp.), traduit par G. SOULIER (ets. Ragonot), Dunod 1954.
- [25] ***"Théorie générale comparative des machines électriques établie à partir des équations du champ électromagnétique"***,
C. RIOUX,
R.G.E. - mai 1970 - t.79, N°5, pp. 415-421.
- [26] ***Technologie d'électricité, tome 5, premier livre : Machines électriques - Traction électrique - Générateurs électrochimiques***,
P. HEINY, R. NAUDY, L. MARTEL,
Editions Foucher 1967, pp. 104-111(alternateurs pour fréquences élevées).
- [27] ***Le transport de force par l'électricité***,
Edouard JAPING et Marcel DEPREZ,
deuxième édition, 1890, Bernard TIGNOL Editeur.
- [28] ***Le règne de l'électricité***,
Gaston BONNEFONT,
Alfred Mame & fils éditeurs, 1895.
- [29] ***Leçons de physique expérimentale (tome 6)***,
Abbé Jean-Antoine NOLLET, 1764.
- [30] ***Le feu du ciel - Histoire de l'électricité et de ses principales applications***,
Arthur MANGIN,
Alfred Mame & fils éditeurs, 1874.
- [31] ***"D C Switched Reluctance Motor"***,
S.A. NASAR,
Proc. IEE, Vol.116, N°6, June 1969, pp.1048-1049.
- [32] ***"Petite histoire de la physique"***,
Jean-Pierre MAURY,
Larousse, 1992.
- [33] ***"Principe et éléments de dimensionnement des machines à réluctance variable à double saillance autopilotées"***,
Bernard MULTON,
Journées électrotechniques du club EEA, 25 et 26 mars 1993, Belfort, 19 p.