

TRAITÉ THÉORIQUE ET PRATIQUE
DES
MACHINES
DYNAMO-ÉLECTRIQUES

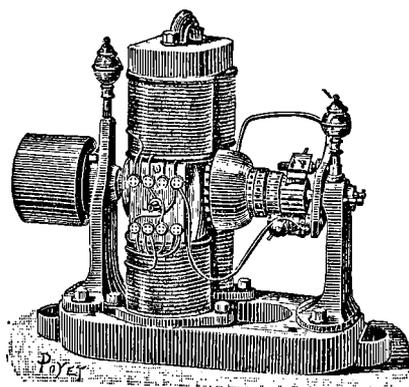
TYPOGRAPHIE GEORGES CHAMEROT

19, RUE DES SAINTS-PÈRES, 19

TRAITÉ THÉORIQUE ET PRATIQUE
DES
MACHINES
DYNAMO-ÉLECTRIQUES

PAR
SILVANUS P. THOMPSON
DIRECTEUR DU COLLÈGE TECHNIQUE DE FINSBURY, A LONDRES

TRADUIT DE L'ANGLAIS PAR E. BOISTEL



PARIS
LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE BAUDRY ET C^{ie}, ÉDITEURS

15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15
MAISON A LIÈGE, RUE LAMBERT-LERÈGUE, 19

1886

Tous droits réservés.

PRÉFACE

Le livre que nous présentons au public est, de l'avis même des Anglais, nos doyens, sinon nos maîtres, en électricité, le plus remarquable peut-être et en tout cas le plus important qui ait paru depuis longtemps sur la science nouvelle.

Vers la fin de 1882, l'Auteur avait fait sur le même sujet une série de conférences (*Cantor Lectures*) dont la publication eut un certain retentissement en Angleterre et dont il nous autorisa gracieusement à donner la traduction. Dans la préface de ce petit fascicule, nous sollicitons vivement l'apparition d'un ouvrage scientifique résumant tous les travaux épars sur les machines dynamo-électriques. Ce vœu, qui, dans notre pensée, s'adressait à nos savants français, a été entendu de l'autre côté du détroit; et, encouragé par le succès de ses conférences, le jeune et éminent professeur qui vient d'être tout récemment l'objet d'une nouvelle distinction en Angleterre a résolument et audacieusement entrepris une œuvre que nul encore n'avait tentée.

Le caractère éminemment pratique de cet ouvrage, à côté des considérations théoriques qui lui servent de base, en fait un guide précieux pour le constructeur aussi bien que pour

a.

l'homme technique et pour tous ceux qui, à un titre quelconque, ont à connaître des principes ou de l'application des machines dynamo-électriques. Au point de vue historique, sa consciencieuse impartialité attribuée à chacun ce qui lui est dû et rend ainsi à la science un service de classement depuis longtemps attendu. C'est en somme le premier livre didactique et méthodique publié sur la matière. A ce titre, nous sommes tout particulièrement flatté d'avoir pu nous en faire l'interprète, et nous remercions l'Auteur et les Éditeurs anglais des facilités qu'ils nous ont données pour le faire connaître et apprécier dans notre pays.

L'œuvre est cependant encore bien incomplète, et l'Auteur ne se fait aucune illusion à cet égard quand il dit modestement dans sa préface : — « Dans une branche aussi jeune de la science, « un traité qui embrasse un grand nombre de sujets nouveaux « ne saurait être exempt d'erreurs dont le temps et l'expérience « feront justice. L'auteur sera reconnaissant à tous ceux qui « s'occupent des machines électriques des communications ou « observations qu'ils pourront lui faire; il sera heureux d'en « voir rejaillir quelque lumière sur certains points encore « obscurs dans le fonctionnement des dynamos. En ce qui « touche particulièrement les diverses questions de théorie ma- « thématique développées dans cet ouvrage et les déductions « pratiques qui en sont tirées, l'auteur est désireux d'arriver à « une évidence encore plus complète; l'étude de types de « machines autres que ceux sur lesquels ont pu porter ses « travaux sera un utile appoint à la formation d'un corps de « doctrine. Tous renseignements relatifs à la distribution de « l'énergie électrique sous courant constant, aussi bien qu'aux « machines à courants alternatifs et aux machines unipolaires,

« seront notamment les bienvenus et contribueront à une généralisation plus sûre de ces théories.

« Il reste en effet beaucoup à faire », ajoute l'auteur, « pour compléter la théorie mathématique de la machine dynamo. Les remarquables travaux de Clausius, si magistralement qu'y soient traités certains points; sont absolument stériles comme résultat. Ces travaux, publiés dans les *Annales de Wiedemann*, en 1883, font entrer en ligne de compte, à l'aide d'une série de constantes arbitraires, un nombre considérable d'actions secondaires en jeu dans les machines. La plupart de ces constantes peuvent, il est vrai, se déterminer directement par l'expérience pour chaque machine ou type de machines; mais, après être parti de ces constantes ainsi susceptibles d'être spécialement déterminées, et après avoir échafaudé ses équations avec un soin minutieux qui les complique trop pour une application immédiate, leur auteur les réduit, à la fin de son mémoire, à une extraordinaire simplicité apparente en y substituant une autre série de constantes dérivées des premières. Ce *tour de force* mathématique est néanmoins fatal : ces nouvelles constantes n'ont plus aucune signification physique, et la simplicité n'est obtenue qu'au prix de leur utilité. Ce triomphe mathématique reste une victoire pyrrique.

« La véritable théorie mathématique de la dynamo ne pourra être donnée qu'après la découverte de la base réelle sur laquelle elle repose. Cette base, c'est-à-dire la loi exacte de l'induction du magnétisme dans l'électro-aimant, n'est pas encore connue. On trouvera dans l'Appendice III quelques renseignements sur ce qui a déjà été fait dans cette voie; mais il n'en demeure pas moins constant que nous n'en pos-

« sédons pas encore la loi précise. et que nous nous contentons
 « de formules qui, tout en étant très approximativement voi-
 « sines de la vérité, ne reposent sur aucun principe primordial
 « et qu'on *sait* incorrectes. Quant aux lois de l'induction du
 « magnétisme dans des circuits constitués partie de fer, et
 « partie de couches d'air ou de fil de cuivre, nous ne savons
 « que fort peu de chose, en dépit des recherches de Rowland,
 « Stoletow, Strouhal, Ewing et Hughes. Nos coefficients de
 « perméabilité et de capacité ou susceptibilité magnétiques,
 « commodes comme symboles, ne sont guère en réalité que
 « des moyens faciles de dissimuler notre ignorance. Il nous fau-
 « drait un savant qui fit pour le circuit magnétique ce que fit,
 « il y a un demi-siècle, le D^r Ohm pour le circuit voltaïque.
 « Tant que nous ne connaissons pas la véritable loi de l'électro-
 « aimant, nous ne pouvons espérer établir la théorie vraie et
 « complète de la dynamo. »

Il est impossible, comme on le voit, de trouver un auteur convaincu moins infatué de son œuvre. C'est un mérite de plus. Ardent pionnier de la science, le professeur S.-P. Thompson ouvre la voie ; il la déblaye, montre le chemin parcouru et invite modestement à l'y suivre tous ceux que sollicitent les immenses horizons à peine encore entrevus.

« Le champ est vaste pour la pratique comme pour la
 « théorie. Si considérables que soient les progrès réalisés de-
 « puis dix ans dans la conception et la construction des ma-
 « chines électriques de tous genres, on n'en est pas encore à
 « pouvoir dire quelle est la meilleure dynamo. Il en est à cet
 « égard comme des divers genres de piles voltaïques, dont les
 « unes sont employées en télégraphique, d'autres pour les son-
 « neries électriques, d'autres encore pour l'explosion des mines.

« Un type se recommande pour un objet spécial, un autre pour
« d'autres applications. Parmi les machines, l'une donne des
« courants plus fixes, une autre est moins susceptible de s'é-
« chauffer, celle-ci est plus ramassée, celle-là est d'un prix
« moins élevé, telle autre présente moins de danger de ren-
« versement des pôles, une sixième donne un courant plus
« intense, tandis qu'une septième développera une force élec-
« tromotrice plus élevée. En fait, dans l'état de transition ac-
« tuel de nos connaissances en ce qui touche les machines
« dynamo-électriques, on peut affirmer sans crainte de se
« tromper que, d'ici à longtemps, on n'arrivera pas à réunir dans
« une seule et même machine une aptitude générale à tous les
« usages. Comme les machines à vapeur, les machines dynamo-
« électriques suivront probablement une évolution constante et
« progressive pour aboutir finalement à deux ou trois types
« qui survivront aux innombrables machines plus ou moins
« imparfaites produites dans ces derniers temps. »

Telles sont les appréciations par lesquelles l'Auteur termine sa préface. Cette absence de parti pris et cette largeur de vues dominant son œuvre et en rehaussent la valeur.

Parmi les critiques qui pourront en être faites, il en est une que nous prévoyons : — l'œuvre est, dira-t-on, conçue à un point de vue un peu anglais. — Il fallait s'y attendre. Chacun connaît mieux ce qui s'est fait dans son propre pays et se trouve naturellement entraîné à mieux l'apprécier. Il est toutefois certains mémoires, tels que ceux de Gaugain, de M. Mascart, etc., que nous aurions aimé à y voir cités. Nous n'avons pu résister au désir de combler en partie cette lacune, et, parmi les trois derniers appendices, marqués d'un *, que nous avons cru pou-

voir ajouter à l'œuvre originale sans la déparer, on trouvera reproduit *in extenso* un travail fort intéressant de M. Mascart, extrait du *Journal de d'Almeida*, 1877.

L'Auteur voudra bien, nous l'espérons, nous pardonner d'avoir ainsi un peu transgressé notre rôle de traducteur. Nous n'avons pas d'ailleurs exagéré ce petit sentiment d'amour-propre national ; les Appendices VII et VIII, puisés à des sources étrangères, en font foi. Nous en assumons d'ailleurs toute la responsabilité au point de vue de leur utilité à la fin de cet ouvrage.

Enfin, désireux de donner encore plus d'actualité à une étude dont l'objet fait chaque jour de nouveaux progrès, nous avons cru devoir y ajouter une description sommaire des types les plus récents des machines employées en France. — M. II. Fontaine a bien voulu nous fournir des documents sur les dernières machines Gramme ; et, la galanterie étant de mise *même* entre électriciens, nous leur avons donné la préséance et la plus large place dans une Note finale où l'on trouvera également quelques renseignements sur les nouveaux types de machines Siemens et congénères.

E. B.

Juin 1885.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages.
PRÉFACE.	I
CHAPITRE PREMIER.	
INTRODUCTION.	1
CHAPITRE II	
THÉORIE PHYSIQUE DES MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES.	7
Relation entre la Vitesse et la Puissance d'une machine dynamo.	17
CHAPITRE III	
Organes des machines dynamo-électriques.	20
Dynamo élémentaire idéale	20
Système induit ou Armatures.	23
Aires des armatures.	31
Spires et Bobines des armatures.	32
Système inducteur ou Electro-aimants.	35
Pièces polaires.	41
Bobines des électro-aimants.	41
Échauffement des électro-aimants.	43
Inducteurs dans la pratique.	45
Commutateurs, Collecteurs et Balais.	47
Balais	50
CHAPITRE IV.	
Induction des courants dans les armatures et Distribution des potentiels autour du collecteur.	54

CHAPITRE V

	Pages.
Réactions dans l'Armature et dans le Champ magnétique.	73

CHAPITRE VI

Moyens de gouverner les machines dynamos.	88
Modes d'excitation du champ magnétique.	88
Machine magnéto-électrique ou Magneto-dynamo	88
Dynamo à Excitation indépendante	88
Dynamo en série ou Series-dynamo.	89
Dynamo en dérivation ou Shunt-dynamo	89
Méthodes de combinaisons.	91
Combinaisons pour Différence de potentiel constante.	94
Excitation en série et par circuit séparé.	94
— en série avec adjonction de machine magnéto.	95
— en série et en dérivation.	97
— en série et en Longue dérivation.	98
Combinaisons pour Courant constant	99
Excitation en dérivation et par circuit séparé.	99
— en dérivation avec adjonction de machine magnéto.	100
— en dérivation et en série	101
Disposition du Double enroulement (Compound).	102
Autres modes de Régulation automatique.	102

CHAPITRE VII

TYPES DE MACHINES.	108
Dynamos de la Classe I.	108
Armatures en Anneau	108
Machine Pacinotti.	108
— Gramme.	110
— Maxim	114
— Hockhausen.	114
— Cabella.	115
— Bürgin-Crompton	116
— Crompton-Kapp	117
— Paterson et Cooper (<i>Phénix</i>).	121
— Heinrich.	122
Armatures en Anneau plat	122
Machine Schuckert	122
— Gülcher.	124
— Schuckert-Mordey (<i>Victoria</i>).	125
— Brush.	134

TABLE DES MATIÈRES.

IX

	Pages.
Armatures Cylindriques	141
Machine Siemens	141
— Edison	147
— Weston	154
— Newton	157
— Elphinstone-Vincent	157
— Houston-Thomson	158
— W. Thomson. (<i>Mouse-Mill</i>)	160

CHAPITRE VIII

Dynamos de la Classe II.	161
Machine Pixii	161
— Niaudet	161
— Wallace-Farmer	161
— Lane-Fox	162
— Brockie	162
— Leipner	162
— Hefner-Alteneck	163
— Hopkinson et Muirhead	163
— Ball (<i>Disque d'Arago</i>)	163
— Ayrton et Perry	163
— Elphinstone-Vincent	165
— Edison (<i>Disque</i>)	165
— <i>poulie</i> de Sir W. Thomson	166
Machines à Courants alternatifs	168
Machine Stöhrer	168
— Nollet	168
— Holmes	168
— de l'Alliance	168
— Wilde	168
— Siemens	170
— Lachauscée	171
— Gordon	171
— Lontin	173
— de Méritens	174
— Gramme	174
— Mechwart-Zipernowsky	175
— Ferranti-Thomson	176

CHAPITRE IX

Dynamos de la Classe III.	182
Roue de Barlow ou de Sturgeon	182
Machine <i>Disque</i> de Faraday	182
— Varley	184

	Pages.
Machine <i>unipolaire</i> Siemens.	184
— Delafield.	186
— Ferraris	186
— Voice	186
Machines non classées	186
Machine <i>pendule</i> d'Edison	187
— Sir Ch. Bright.	187
— Forbes.	187
— Lever.	187
— S.-P. Thompson.	187

CHAPITRE X

THÉORIE ALGÈBRIQUE DE LA MACHINE DYNAMO	188
Bases élémentaires des Calculs. — Notations	188
Dynamo élémentaire idéale.	190
Armature élémentaire d'un grand nombre de spires (sans fer).	194
Armature élémentaire à âme de fer	195
Armature quelconque.	196
Ondulations de la f. é.-m. dans une armature à bobine unique.	198
Ondulations de la f. é.-m. dans une bobine d'armature divisée en sections.	199
Calcul des ondulations de la f. é.-m. dans les bobines d'armature.	203
Mesure de l'ondulation.	208

CHAPITRE XI

Machine magnéto-électrique.	210
Mesure de l'intensité du champ magnétique	211
Potential aux bornes.	212
Machine à Excitation indépendante.	213

CHAPITRE XII

Rendement et Coefficient économique.	214
Variation du Coefficient économique suivant le courant.	217
Relation entre les Dimensions et le Rendement d'une machine.	218

CHAPITRE XIII

Dynâmo en Série ou Ordinaire.	224
Équations déduites de la loi de Saturation.	225
Équation du Courant.	228
Détermination des Constantes.	228
Coefficient économique.	229

TABLE DES MATIÈRES.

XI

	Pages.
<i>Détermination de l'Enroulement des Bobines d'Électro-aimants</i>	230
Importance du Coefficient de Saturation.	231
Note sur le Coefficient de Saturation « σ »	233
— sur le Coefficient « G ».	235
— sur le Coefficient de Perméabilité magnétique « κ ».	236

CHAPITRE XIV

Dynamo en dérivation	237
Équations déduites de la loi de Saturation.	239
Équations du Courant	240
Détermination des Constantes.	241
Coefficient économique.	241
Règles pratiques pour le Calcul d'une machine économique.	244
<i>Détermination de l'Enroulement des Bobines d'Électro-aimants</i>	245

CHAPITRE XV

Dynamos Auto-régulatrices	248
Distribution sous Potentiel constant.	251
Cas (I). — Dynamo en Série + Aimants permanents	251
Cas (II). — Dynamo en Série + Bobines d'excitation séparée	253
<i>Détermination de l'Enroulement des Bobines d'Électro-aimants</i>	254
Cas (III). — Dynamo en Série + Force électromotrice indépen- dante dans le circuit principal.	255
<i>Détermination de l'Enroulement des Bobines d'Électro-aimants</i>	257
Cas (IV). — Dynamo en Série + Bobines excitatrices en dérivation : DYNAMO COMPOUND.	258
Dynamo en Série et en Dérivation	259
<i>Détermination de l'Enroulement des Bobines inductrices</i>	261
Dynamo en Série et en Longue dérivation.	262
<i>Détermination de l'Enroulement des Bobines inductrices</i>	264
Effet pratique du Terme de Saturation dans les Machines Compound.	264
Effet de la Réaction et de l'Induit	265
Distribution sous Courant constant ou à Intensité constante	265
Cas (I). — Dynamo en Dérivation + Aimants permanents.	266
<i>Détermination de l'Enroulement des Bobines inductrices</i>	267
Cas (II). — Dynamo en Dérivation + Bobines d'excitation séparée.	267
<i>Détermination de l'Enroulement des Bobines inductrices</i>	268
Cas (III). — Dynamo en Dérivation + Force électromotrice indé- pendante agissant dans le circuit.	268
<i>Détermination de l'Enroulement</i>	270
Cas (IV). — Dynamo en Dérivation + Bobines excitatrices en série : DYNAMO COMPOUND.	271
(a.). — Dynamo en Dérivation et en Série.	271

	Pages.
(b.). — Dynamo en Longue Dérivation + Bobines régulatrices en Série.	272
<i>Détermination de l'Enroulement.</i>	273
Coefficient économique d'une Dynamo Compound quelconque.	273

CHAPITRE XVI

Dynamos à Courants alternatifs.	274
--	-----

CHAPITRE XVII

THÉORIE GÉOMÉTRIQUE DE LA MACHINE DYNAMO.	285
Courbe d'une Machine Magnéto-électrique.	286
Courbe de Saturation d'un Électro-aimant.	287
Caractéristiques des Dynamos.	291
Caractéristiques de Puissance en Chevaux-vapeur.	295
Caractéristiques « Extérieures »	298
Caractéristique d'une Machine Magnéto et d'une Dynamo à Excitation indépendante.	300
Caractéristiques des Dynamos en Série.	301
Relation entre la Caractéristique et la Vitesse.	303
De la Résistance dans la Caractéristique.	304
Relation entre la Caractéristique et l'Enroulement des inducteurs et de l'induit.	306
Courant critique d'une machine.	308
Application des Caractéristiques	309
Détermination de la Vitesse la plus faible possible pour une Dynamo alimentant un Foyer à arc.	309
Emploi de la Caractéristique pour expliquer l'Instabilité de la Lumière à arc.	310
Relation entre la Caractéristique et les Dimensions d'une machine.	311
Caractéristique d'une Dynamo en Dérivation.	312
Courbe du courant total dans l'Induit.	316
Caractéristique totale de la Dynamo en Dérivation.	316
Caractéristique d'une Dynamo en Dérivation avec Aimantation permanente.	317
Caractéristiques des Dynamos Auto-régulatrices.	318
Distribution sous Différence de Potentiel constante.	318
Caractéristiques externes des Dynamos Auto-régulatrices.	321
Distribution à Intensité constante.	322
Application des Caractéristiques aux Dynamos employées à la charge des Accumulateurs.	323
Courbes du Couple mécanique.	325
Courbe de Variation du Coefficient économique.	327
Courbe de la Force dépensée pour le Maintien du Champ magnétique.	329

CHAPITRE XVIII

	Pages.
LA MACHINE DYNAMO CONSIDÉRÉE COMME MOTEUR.	330
Moteurs Ritchie	332
— Jacobi	333
— Sturgeon	333
— Henry, Dal Negro, Page	334
— Bourbouze	335
— Froment	336
— Wheatstone.	336
— Trouvé, Wiesendanger, Page, Davidson, Soren Hjörth	337
Principes généraux.	337

CHAPITRE XIX

THÉORIE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES.	341
Diagramme de S.-P. Thompson.	348
Loi d'Activité maxima (Jacobi)..	350
Loi du Rendement maximum (Siemens).	351
Transport électrique de l'Énergie.	353

CHAPITRE XX

Réaction entre les Inducteurs et l'Induit dans une machine réceptrice.	361
---	-----

CHAPITRE XXI

TYPES SPÉCIAUX DE MOTEURS.	366
Machines réceptrices Gramme et Siemens.	366
Moteurs Gramme.	366
— Marcel Deprez.	367
— Griscom.	367
— Howe, Cattriss, Trouvé.	368
Treuils Siemens.	368
— Hopkinson.	368
Moteurs de Méritens.	370
— Ayrton et Perry	370
— Reckenzaun.	372
— S.-P. Thompson	373

CHAPITRE XXII

Renversement de marche des Moteurs.	375
Inverseur Hopkinson.	375

	Pages.
Inverseur Reckenzaun	376
— Ayrton et Perry	376
— S.-P. Thompson	377

CHAPITRE XXIII

Vitesse et Couple mécanique d'un moteur en fonction du Courant qui l'alimente	378
--	------------

CHAPITRE XXIV

Moyens de gouverner les moteurs	381
Régulateurs à Force centrifuge	381
— Dynamométriques	382
— Électriques	383
Théorie des moteurs auto-régulateurs	384
Alimentation sous Différence de Potentiel constante	385
Moteur magnéto avec Bobines régulatrices en série	385
<i>Détermination du Potentiel et de l'Enroulement convenables pour un moteur donné</i>	<i>386</i>
Moteur en dérivation avec Bobines régulatrices en série	387
<i>Détermination de l'Enroulement</i>	<i>388</i>
Alimentation à intensité constante	389
Moteur en série avec Bobines régulatrices en dérivation	389
<i>Détermination de l'Enroulement</i>	<i>390</i>
Moteur en série avec Bobines régulatrices en Longue dérivation	390

CHAPITRE XXV

Solution par les méthodes graphiques de quelques Problèmes relatifs aux moteurs	393
--	------------

CHAPITRE XXVI

ÉPREUVES DES MACHINES GÉNÉRATRICES ET RÉCEPTRICES	398
Mesure de la puissance mécanique	400
Méthode graphique	400
Méthode du frein	400
Méthode dynamométrique	402
Méthode d'équilibre	405

APPENDICES

Appendice I. — Mesure du Coefficient de self-induction d'une bobine	408
Appendice II. — Mesure de l'Induction mutuelle de deux bobines	408

TABLE DES MATIÈRES.

xv

	Pages.
Appendice III. — Formules relatives aux Électro-aimants	410
Appendice IV. — Sur les Équations générales des machines dynamo- électriques et la théorie de M. Joubert	413
Appendice V. — Sur le prétendu Retard magnétique	415
Appendice VI. — Mouvement du Point neutre (W.-M. Mordey).	417
Appendice VII*. — Principe de la Bobine Siemens.	420
Appendice VIII*. — Force électromotrice et Différence du potentiel.	423
Appendice IX*. — Des Machines magnéto-électriques et électro-dyna- miques (Mascart)	426

NOTE*

Sur quelques nouvelles formes des Machines-types Gramme et Siemens ou congénères.	443
INDEX ALPHABÉTIQUE.	461

LES MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES

CHAPITRE PREMIER

INTRODUCTION

Par machine « dynamo-électrique », dans le sens étymologique le plus général du mot, on entend une machine destinée à convertir l'énergie sous forme de mouvement mécanique en énergie sous forme de courants électriques, ou *vice versa*. Cette large définition ne comprend pas les machines telles que la machine d'induction statique, bien connue, de Holtz, dont l'action est purement électro-statique; elle s'applique uniquement aux machines dont l'action repose sur le principe d'induction électro-magnétique découvert par Faraday en 1831. Il n'est cependant pas aussi facile qu'on pourrait le croire de préciser quelles sont les machines qu'on doit appeler dynamo-électriques, à cause du sens étroit dans lequel est prise communément cette expression, et de la restriction peu logique qu'on lui donne.

Le nom de machine dynamo-électrique paraît avoir été employé pour la première fois par le Docteur Werner Siemens, dans sa communication du 17 janvier 1867 à l'Académie de Berlin, communication dans laquelle il décrit une machine basée sur l'emploi d'une force mécanique à la production de courants électriques induits, dans les spires d'une armature¹ rotative, sous l'action

1. Nous maintenons le mot anglais « *armature* », qui s'introduit d'ailleurs dans notre langue comme synonyme d'*induit*, et dont l'application aux machines dynamos est tout à fait corrélatrice de son affectation déjà ancienne aux aimants. (*N. du T.*)

d'électro-aimants excités eux-mêmes par les courants ainsi engendrés. Cette machine était en fait une machine auto-excitatrice à électro-aimants et armature disposés « en série » sur le circuit extérieur, ou ce que nous appelons aujourd'hui une « dynamo en série », dont la figure 1 donne le diagramme. Mais l'expression de machine dynamo-électrique, alors introduite dans la technolo-

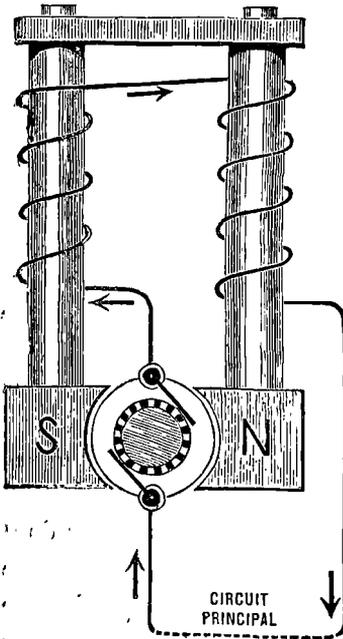


FIG. 1. — Dynamo en Série.
(Series-dynamo.)

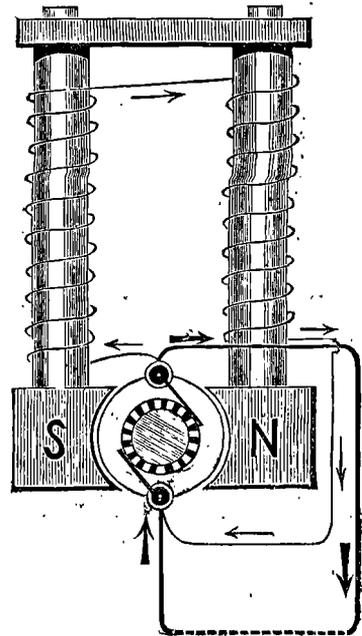


FIG. 2. — Dynamo en Dérivation.
(Shunt-dynamo.)

gie électrique, n'a pas conservé cette étroite signification. Elle n'a pas tardé à être appliquée à des machines de la même famille, également auto-excitatrices, mais dans lesquelles une portion seulement du courant total engendré par la rotation de l'armature est employée à exciter les électro-aimants (fig. 2). Ce mode d'excitation (aujourd'hui appliqué aux machines connues sous le nom de « dynamos en dérivation » ou « shunt-dynamos »), introduit pour la première fois par Wheatstone, n'est qu'une modification de détail de la disposition précédente, et il n'y a pas à forcer l'expression originale pour l'appliquer aux deux cas. En fait, cette dé-

nomination a été sanctionnée par la pratique, en raison de ce qu'elle se prête parfaitement à la distinction entre ces deux sortes de machines et celles qui n'étaient pas auto-excitatrices, mais dans lesquelles des aimants en acier ou des électro-aimants à excitation indépendante étaient employés à la production du champ magnétique.

Cependant, depuis le grand développement qu'a pris l'éclairage électrique, on a trouvé avantageux d'employer, dans certains cas, des machines génératrices où le principe de l'auto-excitation ne subsiste plus. Certains systèmes d'éclairage électrique exigent des courants alternatifs, produits dans des machines qui ne peuvent donner à leurs propres électro-aimants une aimantation continue. Dans d'autres systèmes, on fait bien usage de courants continus, mais en appliquant ce principe d'expérience qu'on obtient plus de régularité dans le courant quand les électro-aimants des dynamos sont excités en dehors d'elles-mêmes par des courants provenant d'une source extérieure. De là une troisième classe de machines dynamo-électriques, les dynamos à excitation indépendante (fig. 3), en réalité antérieures aux précédentes, puisqu'elles remontent à Wilde (1866). En somme, une dynamo est une dynamo, que ses électro-aimants soient excités par la totalité de son propre courant, ou par une portion seulement de ce courant, ou encore par un courant issu d'une source étrangère. Peu importe l'origine de l'action magnétisante, pourvu qu'il y ait production d'un « champ » magnétique d'intensité suffisante, dans lequel puissent tourner les spires génératrices. Dès lors, étant admis que l'origine de l'action magnétisante est indifférente, nous

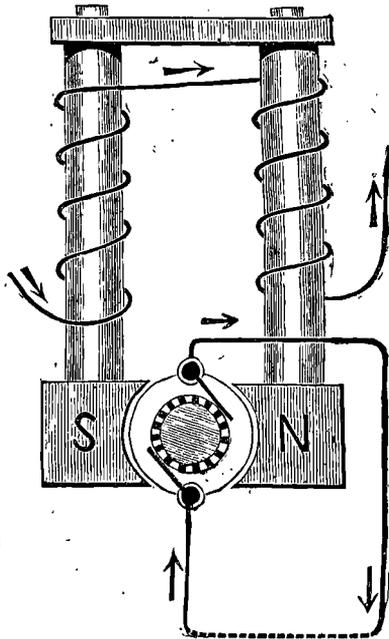


FIG. 3.

Dynamo à Excitation indépendante.

devons évidemment comprendre, parmi les sources possibles de cette action, celle des aimants permanents en acier. Bref, la distinction arbitraire entre les machines dites *magnéto-électriques* (fig. 4) et les machines *dynamo-électriques* disparaît devant un examen approfondi. Dans toutes ces machines, un inducteur, soit excité d'une façon permanente, soit excité par une source étrangère, ou encore directement excité, sert à produire un champ de force magnétique; et, dans toutes ces machines, une puissance dynamique est employée à la production du travail de rotation des spires de l'armature pour engendrer les courants électriques.

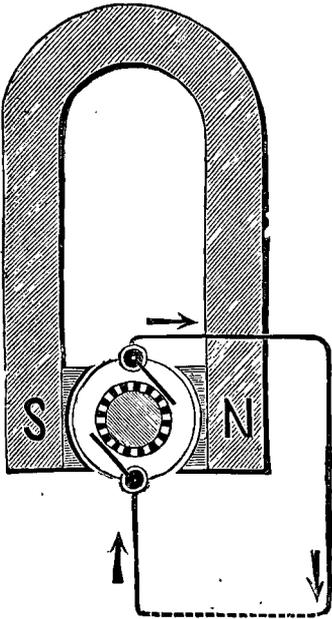


FIG. 4. — Dynamo à Aimants permanents. (Magneto-dynamo).

On peut donc définir exactement et d'une manière générale une machine dynamo-électrique dans les termes suivants : *une machine dynamo-électrique est une machine destinée à convertir l'énergie sous forme de puissance dynamique en énergie sous forme de courants électriques, par la mise en rotation de conducteurs*¹ (ordinairement des bobines de fil de cuivre) *dans un champ magnétique.*

Cependant, comme toute machine dynamo-électrique, dans le sens le plus étendu du mot tel que nous l'avons établi, peut fonctionner comme

moteur et devenir une source de puissance mécanique quand elle est alimentée par des courants électriques, il est possible de l'envisager sous ces deux points de vue ou suivant ses deux modes inverses de fonctionnement, c'est-à-dire de l'étudier d'une part comme *générateur*, et d'autre part comme *moteur*. Et, bien que ces deux modes de fonctionnement soient régis par une seule et même théorie de la forme mathématique la plus générale, nous les

1. Ici, comme dans tout ce qui suit, il faut entendre par conducteur, fil, etc., en mouvement dans un champ magnétique, un conducteur, fil, etc., fermé sur un circuit quelconque et formant avec lui un cycle complet. (N. du T.)

considérerons dans cet ouvrage indépendamment l'un de l'autre.

La théorie mathématique de la machine dynamo est en réalité très complexe, et son exposition affecte des formes différentes suivant les diverses classes de machines comprises aujourd'hui sous le nom de « dynamos ». Il y a, pour les différentes espèces de machines comprises dans chacune de ces classes, autant de symboles mathématiques différents. La théorie des machines à courants alternatifs diffère complètement de celle des machines destinées à fournir des courants continus et constants. Chaque forme d'armature et de bobines demande à être symboliquement traitée d'une façon spéciale, et la simple question d'introduction de noyaux en fer dans les bobines entraîne, quand on la traite mathématiquement, à des expressions si complexes qu'on ne peut guère espérer arriver à une solution générale satisfaisante, à moins d'user largement de « constantes » empiriques qui doivent être expérimentalement déterminées pour chaque machine.

La théorie de la dynamo que nous développerons ici ne sera donc pas une théorie mathématique générale. Nous nous attacherons plutôt aux idées physiques et expérimentales qu'aux conceptions mathématiques, bien que nous ne puissions nous dispenser d'employer ici, comme dans tout ouvrage scientifique, des symboles mathématiques. La théorie physique de la dynamo n'est pas d'ailleurs chose nouvelle; mais il n'en a pas encore été donné une bien complète¹, la plupart des documents y relatifs s'appliquant à des machines spéciales d'un type déterminé.

Il y a en réalité trois méthodes distinctes de traiter les principes de la dynamo : 1° une méthode physique ayant pour point de départ les lignes de force magnétiques et les lignes de courant, et dans laquelle ces éléments, indépendamment du pourquoi et du comment, servent de base d'exposition; 2° une méthode algébrique basée sur les lois mathématiques de l'induction électrique et de la mécanique rationnelle; 3° une méthode graphique fondée sur la possibilité de représenter l'action d'une dynamo par une courbe

1. Voir ANTOINE BREGUET, *Annales de Chimie et de Physique*, 1879; DU MONCEL, *Exposé des Applications de l'Électricité*, t. II; NIAUDET, *Machines électriques*; DREDGE et autres, y compris l'auteur de cet ouvrage, *Electric illumination*; SCHELLEN, *Die Magneto-und Dynamo-elektrischen Maschinen* (3^e édition, 1883); CUNNYNGHAME, *The Law of Electric Lighting*, 1883.

dite « caractéristique », primitivement conçue par le Docteur Hopkinson, et développée ensuite par le Docteur Frölich, puis par M. Deprez et autres.

Ces trois méthodes sont par le fait trois aspects différents de la théorie. Le nombre des lignes de force magnétiques, dont nous nous occupons dans le chapitre suivant, peut être représenté géométriquement par une certaine longueur de ligne, ou algébriquement par le symbole N , ou bien encore en perspective pour ainsi dire par une simple démonstration parlant aux yeux. Ce que les uns écrivent N , d'autres l'indiquent par une certaine longueur dans une certaine direction. En somme, divers procédés, algèbre, géométrie ou diagrammes, nous conduisent vers la véritable théorie; et chacun de ces procédés a sa valeur.

Mon objectif est de développer tout d'abord une théorie physique générale applicable à tous les types de machines dynamo-électriques, et d'en déduire un certain nombre de corollaires relatifs à la construction de ces machines. Ces conséquences déduites de la théorie une fois exposées, il restera à voir comment elles sont réalisées et comment elles se vérifient dans les différentes formes attribuées dans la pratique aux machines dynamos. Puis viendront des chapitres sur les méthodes algébrique et géométrique de traiter la question. La dernière section de cet ouvrage sera dévolue à la dynamo considérée comme moteur mécanique.

CHAPITRE II

THÉORIE PHYSIQUE DES MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES

Toutes les dynamos reposent sur la découverte faite par Faraday en 1831, à savoir la naissance de courants électriques dans des conducteurs en mouvement dans un champ magnétique. Le principe de Faraday peut s'énoncer de la manière suivante : — Quand un conducteur est mis en mouvement, dans un champ de force magnétique, d'une manière quelconque, mais de façon à couper les lignes de force, il se développe dans le conducteur une force électromotrice dans une direction perpendiculaire au sens du mouvement ainsi qu'à la direction des lignes de force, et à droite des lignes de force vues du point d'où part le mouvement¹.

Ainsi que l'a montré Faraday, cette force électromotrice induite est proportionnelle au nombre de lignes de force magnétiques coupés dans une seconde, et, par suite, à l'intensité du « champ » magnétique, ainsi qu'à la longueur et à la vitesse de déplacement du conducteur en mouvement. Pour des courants constants, le flux d'électricité dans le conducteur est, d'après la loi bien connue d'Ohm, directement proportionnel à cette force électromotrice, et inversement proportionnel à la résistance du conducteur. Ceci cesse d'être vrai pour des courants instantanés ou pour des courants dont l'intensité varie rapidement; et c'est là un des points les plus importants,

1. L'adaptation suivante de la règle bien connue d'Ampère au cas qui nous occupe fixe mieux dans la mémoire le sens des courants induits. Supposons un nageur placé dans un conducteur et tourné de manière à regarder dans la direction positive des lignes de force; alors, si le conducteur et lui se meuvent vers sa droite, il verra dans le sens du courant induit par ce mouvement.

bien que trop souvent négligé, dans la construction des machines dynamo-électriques, que la « résistance » d'une bobine de fil ou d'un circuit est loin d'être le seul obstacle qui s'oppose à la production d'un courant momentané dans cette bobine ou ce circuit; la « *self-induction* », « induction propre » ou « auto-induction », exercée par une partie d'une bobine ou d'un circuit sur une ou plusieurs autres parties de ce même conducteur joue, dans bien des cas, un rôle aussi important, et, souvent même, un rôle plus considérable que la résistance.

Pour bien comprendre le principe de Faraday, c'est-à-dire comment le fait de mouvoir un fil de manière à lui faire couper des

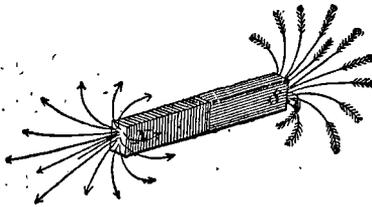


Fig. 5. — Lignes de force d'un Barreau aimanté.

lignes de force magnétiques peut donner naissance à un courant d'électricité dans ce fil, il nous faut voir tout d'abord ce qu'est un courant d'électricité.

Un fil parcouru par un courant d'électricité ne diffère pas en apparence de tout autre fil. Personne n'a encore vu l'électricité

parcourant un fil et ne sait exactement ce qui se passe. A vrai dire, c'est encore un point controversé que de savoir comment s'écoule l'électricité, ou s'il y a ou non deux courants marchant simultanément en sens contraire. Tant que nous ne saurons pas, d'une façon absolument certaine, ce qu'est l'électricité, nous ne pouvons espérer savoir d'une manière précise ce qu'est un courant d'électricité. Mais il est un point capital qui ne fait doute pour aucun électricien, c'est que, lorsqu'un courant électrique traverse un fil, les forces magnétiques dont la manifestation apparaît dans le fil, pendant ce temps, résident non pas dans le fil lui-même, mais bien dans l'espace qui l'entourne. Chacun sait que l'espace ou « champ » environnant un aimant est rempli de « lignes de force » magnétiques, et que ces lignes se dirigent, sous forme de houppes (fig. 5), du pôle N. au pôle S. de l'aimant¹, invisibles tant qu'on ne les révèle pas en saupoudrant le champ de limaille de fer

1. Ici, comme dans tout le cours de cet ouvrage, nous désignons par pôle N. et pôle S. les pôles qui se dirigent respectivement vers le pôle N. et le pôle S. de la terre.

qui accuse alors leur présence, bien qu'en réalité elles y existent toujours (fig. 6). Vu de bout, le champ magnétique au pôle d'un

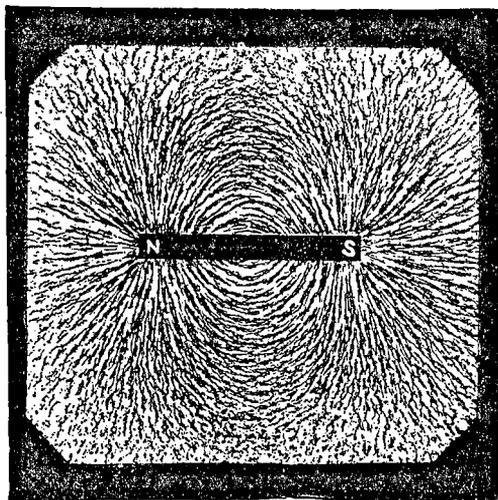


FIG. 6. — Champ magnétique d'un Barreau aimanté.

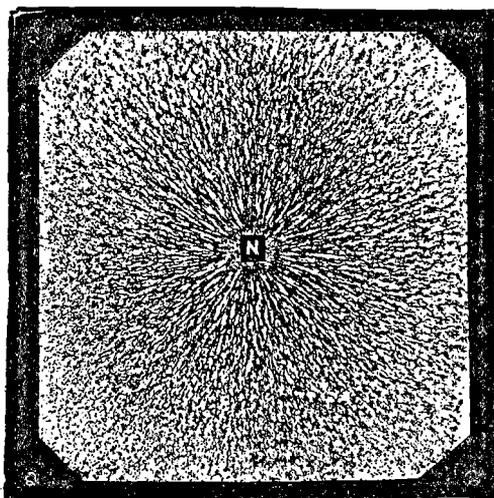


FIG. 7. — Champ magnétique autour d'un Pôle, vu de bout.

barreau aimanté ne présenterait, naturellement, que des lignes rayonnantes, comme dans la figure 7.

Maintenant, tout courant électrique (pour nous servir du terme adopté) est environné d'un champ magnétique, dont les lignes de force peuvent être révélées de la même manière. Pour les observer, on perce dans une carte ou dans un morceau de verre un trou à travers lequel on fait passer le fil qui conduit le courant. Si alors on saupoudre le champ de limaille de fer, cette limaille se dispose en cercles concentriques (fig. 8) qui prouvent que les lignes de force entourent complètement le fil, au lieu de former des houppes

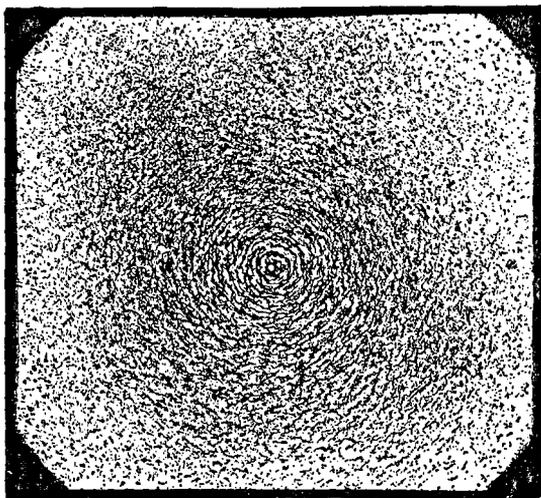


FIG. 8. — Champ magnétique entourant un Courant.
Le fil conducteur est vu de bout.

extérieures. En réalité, tout fil conducteur est entouré d'une sorte de tourbillon magnétique, analogue à ce qu'indique la figure 9. Une grande partie de l'énergie de ce que l'on est convenu d'appeler courant électrique dans le fil consiste dans ces tourbillons magnétiques extérieurs. Leur développement exige une dépense d'énergie et leur maintien demande également une dépense constante d'énergie. Ce sont ces tourbillons magnétiques qui agissent sur les aimants et tendent à les mettre, comme les aiguilles des galvanomètres, à angles droits avec le fil conducteur.

Dès lors, le principe de Faraday revient à ceci, — que le mouvement d'un fil dans le voisinage d'un aimant; à travers un espace rempli de lignes magnétiques, et à la condition qu'il coupe trans-

versalement ces lignes magnétiques, développe des tourbillons magnétiques autour du fil ainsi mis en mouvement, ou, en d'autres termes, donne naissance à ce que l'on nomme un courant d'électricité dans ce fil. L'introduction d'un pôle d'aimant dans une boucle ou dans un circuit de fil engendre nécessairement aussi un courant momentané dans la boucle de fil, en raison de ce qu'il y développe momentanément des tourbillons magnétiques. Dans le langage de Faraday, cette action augmente le nombre des lignes de force magnétiques interceptées par le circuit.

Il est cependant de toute nécessité que le conducteur mobile coupe dans son mouvement les lignes de force, de manière à modifier le nombre de ces lignes pénétrant le circuit dont fait partie le conducteur mobile. Si l'on fait mouvoir un circuit conducteur — fil en forme d'anneau ou simple spire par exemple — le long d'un champ magnétique uniforme, comme l'indique la figure 10, de telle sorte qu'il soit toujours traversé par les mêmes lignes de force, aucun courant n'y prendra naissance. De même encore, comme le montre la figure 11, si la spire se déplace, par un mouvement de translation, vers une autre partie uniforme du champ magnétique, elle laissera derrière elle autant de

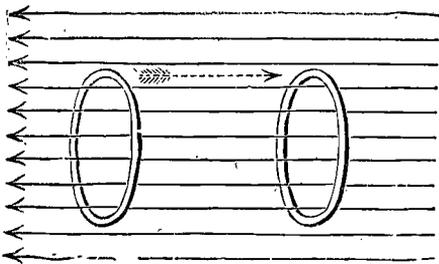


FIG. 10. — Circuit ne coupant pas, dans son mouvement, les lignes de force d'un champ magnétique uniforme.

mouvement ne fera naître encore aucun courant. Mais si, comme dans la figure 12, la spire s'incline dans son mouvement à travers

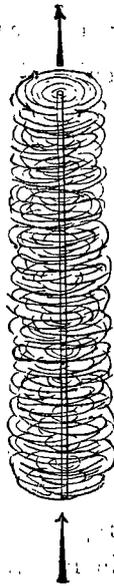


FIG. 9. — Tourbillon magnétique autour d'un fil parcouru par un courant.

lignes de force qu'elle en gagnera en avançant de sa première à sa seconde position, et il ne s'y développera aucun courant. Si celle-ci tourne simplement sur elle-même autour d'un axe central, comme la jante d'une poulie, elle ne coupera pas une ligne de force de plus que précédemment, et ce

le champ uniforme, ou si elle tourne autour d'un axe quelconque situé dans son propre plan, alors le nombre des lignes qui la traversent sera modifié, et des courants seront engendrés. Ces courants parcourront le circuit dans le sens positif¹ (étant admis que l'on

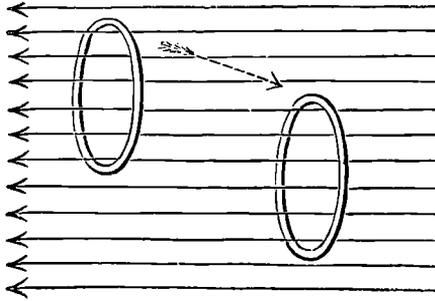


FIG. 11. — Circuit ne coupant pas, dans son mouvement, plus de lignes de force.

regarde du point vers lequel sont dirigées les lignes de force), si le mouvement a pour effet de diminuer le nombre des lignes de force coupées par le circuit; ils circuleront en sens contraire (néga-

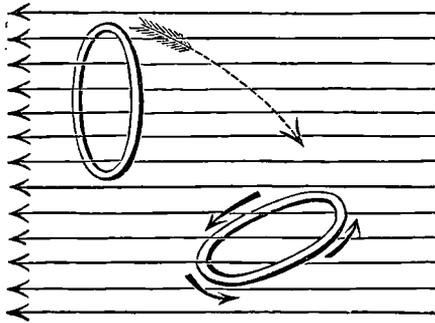


FIG. 12. — Circuit coupant, dans son mouvement, des nombres variables de lignes de force.

tif), si le mouvement a pour effet d'augmenter le nombre des lignes de force interceptées.

Si le champ de force n'est pas uniforme, alors le seul fait de déplacer la bobine, par un simple mouvement de translation, d'un

1. Le sens positif du mouvement dans un cercle est celui opposé au sens de rotation des aiguilles d'une montre.

endroit où les lignes de force sont resserrées à un autre où elles sont moins denses, comme de la première à la seconde position dans la figure 13, déterminera la naissance de courants ; il en sera de même si le mouvement a lieu vers un endroit où les lignes de force sont dirigées en sens contraire, et, dans ce cas, l'action sera encore plus énergique.

Les considérations qui précèdent et quelques-unes de leurs conséquences immédiates peuvent se grouper dans le résumé suivant :

1° Une partie au moins de l'énergie d'un courant électrique se

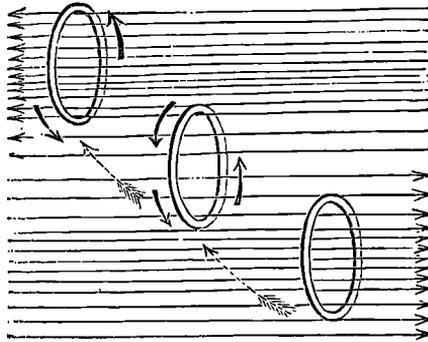


Fig. 13. — Mouvement d'un circuit dans un champ magnétique non uniforme.

présente sous forme de tourbillons magnétiques dans l'espace qui entoure le conducteur ;

2° On peut donner naissance à des courants dans des conducteurs en déterminant autour d'eux des tourbillons magnétiques ;

3° Ces tourbillons magnétiques, résultats de courants électriques, prennent naissance soit sous l'influence d'aimants mis en mouvement dans le voisinage des conducteurs, soit par suite du mouvement des conducteurs dans le voisinage d'aimants ;

4° La production et le maintien de ces tourbillons magnétiques exigent une dépense continue d'énergie, ou, en d'autres termes, absorbent du travail ;

5° Pour qu'il y ait induction de courants dans un conducteur, il faut, entre le conducteur et l'aimant, un mouvement relatif

de nature à modifier le nombre des lignes de force interceptées par le circuit ;

6° Une augmentation dans le nombre des lignes de force interceptées par le circuit produit un courant de sens contraire à celui que détermine une diminution dans le nombre de ces mêmes lignes de force ;

7° Le rapprochement induit une force électromotrice de sens contraire à celle qui résulte de l'éloignement ;

8° Plus un pôle d'aimant ou un champ magnétique est puissant, plus, toutes choses égales d'ailleurs, le courant produit est considérable ;

9° Plus le mouvement est rapide, plus les courants sont intenses ;

10° Plus grande est la longueur du conducteur mobile qui coupe les lignes de force (c'est-à-dire plus les barres sont longues ou plus les spires de fil sont nombreuses), plus les courants engendrés sont intenses ;

11° Plus les parties non utilisées du conducteur sont courtes, plus le courant a d'intensité ;

12° Le rapprochement étant forcément limité, le fait du rapprochement et de l'éloignement relatifs d'une bobine et d'un aimant doit nécessairement engendrer des courants de sens alternatifs ;

13° L'emploi d'un commutateur convenable permet de diriger dans le même sens tous les courants, directs ou inverses, produits pendant le rapprochement ou l'éloignement, dans le fil qui doit porter ces courants aux circuits extérieurs ; on obtient ainsi un courant presque uniforme ;

14° Dans un circuit parcouru par un courant continu¹, le genre d'aimants employés à produire le champ magnétique nécessaire est indifférent : on peut se servir soit d'aimants permanents en acier, soit d'électro-aimants, ces derniers à auto-excitation ou à excitation différente ;

15° Il résulte de là qu'on peut employer le courant même du générateur à l'excitation magnétique des électro-aimants, en le faisant passer, soit tout entier, soit partiellement ; dans leurs bobines.

¹ 1. Pour des courants non continus, il faut tenir compte d'autres considérations, comme nous le verrons plus loin.

Ces principes ont servi de base à la construction d'un très grand nombre de machines dynamo-électriques. La variété en est si considérable qu'une classification n'en est réellement pas facile. Parmi les auteurs, les uns ont essayé de classer les dynamos d'après certains éléments de leur construction, tels que la présence ou l'absence de fer dans les parties mobiles (ce qui est un simple détail de construction, presque toutes les dynamos fonctionnant, plus ou moins bien, il est vrai, avec ou sans fer dans leurs armatures); ou bien encore suivant que les courants engendrés sont continus et directs, ou alternatifs (ce qui n'est, la plupart du temps, qu'une question de disposition des éléments du commutateur ou des collecteurs); d'autres ont pris pour base la forme de l'armature mobile (ce qui est encore une affaire de choix dans la construction, bien plutôt qu'une question de principe). La classification que j'adopterai me paraît plus satisfaisante et plus rationnelle que toute autre. Je distingue trois catégories ou principales classes de dynamos :

CLASSE I. — Dynamos caractérisées par la rotation d'une bobine ou de bobines dans un champ de force uniforme¹, cette rotation s'effectuant (de la manière indiquée par la figure 12, page 12) autour d'un axe situé dans le plan de la spire ou d'un axe parallèle à celui-ci.

Exemples : Machines Gramme, Siemens (Alteneck), Edison, Lontin, Bürgin, Fein, Schuckert, Jürgensen (dynamo Mouse-Mill de Thomson), [Brush].

CLASSE II. — Dynamos caractérisées par un mouvement de translation² de bobines en différentes parties d'un champ complexe

1. Ou à peu près uniforme. L'anneau Gramme ni l'armature cylindrique Siemens ne fonctionnent en réalité dans un champ uniforme; ces deux armatures sont disposées pour fonctionner dans un champ constitué par des lignes de force passant uniformément, d'un côté à l'autre. Dans un champ de cette nature, une armature multipolaire, composée de plusieurs bobines, comme celle de Wilde, ou celle employée dans les machines à courants alternatifs de Siemens ou de Gramme, est inutile et n'a aucune raison d'être. En fait, la classification revient à peu près à dire que, dans les machines de la Classe I, il n'existe qu'un seul champ de force, tandis que, dans les machines de la Classe II, il y en a plusieurs ou que le champ de force total est complexe.

2. Le mouvement par lequel les bobines individuelles sont entraînées circulairement dans des armatures telles que celles de Niaudet, Wallace-Farmer, Siemens (à courants alternatifs), etc., n'est naturellement pas une simple translation. Il peut être considéré cependant comme une combinaison d'un mouvement de translation de la

d'intensité variable, ou de signe contraire. Une partie, mais non pas la totalité, des machines de cette classe fournit des courants alternatifs.

Exemples : Machines de Pixii, Clarke, Holmes, Niaudet, Wallace-Farmer, Wilde (à courants alternatifs), Siemens (à courants alternatifs), Hopkinson et Muirhead, Thomson-Ferranti (à courants alternatifs), Gordon (à courants alternatifs), Siemens-Alteneck (dynamo à disque), Ayrton et Perry (dynamo à spires obliques), Edison (dynamo à disque), Thomson (dynamo-poulie), de Méritens.

CLASSE III. — Dynamos munies d'un conducteur tournant de manière à produire une augmentation continuelle dans le nombre des lignes de force coupées, au moyen du glissement d'une partie du conducteur soit sur l'aimant, soit autour de lui ou sur toute autre portion du circuit.

Exemples : Machines Disque de Faraday, Siemens (dynamo « unipolaire »), Voice.

Une machine, et une seule, suivant moi, ne rentre exactement dans aucune de ces classes¹ : c'est la singulière dynamo élucubrée par Edison, dans laquelle les bobines, au lieu de tourner autour d'un axe, reçoivent un mouvement de va-et-vient à l'extrémité d'un gigantesque balancier à oscillations régulières.

Supposons donc qu'il s'agisse de construire une dynamo de l'une de ces catégories, de la première, par exemple; pour peu qu'on soit familiarisé avec le principe de Faraday et ses corollaires, on verra que, pour obtenir des courants électriques puissants, la

bobine autour d'une circonférence de cercle, avec une rotation de la bobine autour de son axe propre qui n'a, comme nous l'avons vu précédemment, aucun effet électrique. C'est la translation de la bobine dans les différentes parties du champ qui constitue le mouvement effectif.

1. Il existe un petit nombre de dynamos, y compris celle d'Elphinstone-Vincent et celle de Gülcher à quatre pôles, qui, bien qu'appartenant réellement à la première classe, ne sont pas comprises dans la nomenclature ci-dessus, parce que ce sont, en fait, des machines composées. La machine Gülcher, avec ses électro-aimants doubles et ses quatre balais collecteurs, est effectivement une machine double, bien qu'elle ne possède qu'un seul anneau. Il en est de même de la machine Gramme octogonale à quatre balais. La machine Schuckert-Mordey, ou machine *Victoria*, bien qu'elle n'ait que deux balais, appartient à la même catégorie. La machine Elphinstone-Vincent, remarquable à beaucoup d'égards, est une machine triple, munie de six balais ou de deux balais seulement dans les types les plus récents; elle peut remplacer trois machines pour alimenter trois circuits séparés.

machine doit être établie, comme grandes lignes, sur les bases suivantes :

a. Les électro-aimants doivent être aussi énergiques et leurs pôles aussi rapprochés que possible ;

b. Les bobines élémentaires qui composent l'armature doivent contenir la plus grande longueur de fil possible ;

c. Le fil de l'armature doit être aussi gros que possible pour offrir peu de résistance ;

d. Une machine à vapeur très puissante doit être employée à actionner la bobine, en raison de la considération suivante :

e. La vitesse de rotation doit être aussi grande que possible.

On ne peut malheureusement pas réaliser toutes ces conditions à la fois, en raison de certaines incompatibilités entre les unes et les autres ; un grand nombre d'autres conditions secondaires interviennent d'ailleurs et doivent être prises en considération dans la construction d'une bonne machine dynamo. Nous nous occuperons successivement de ces différents points, en commençant par la vitesse de la machine.

Relation entre la Vitesse et la Puissance d'une machine dynamo.

La théorie indique que, si l'intensité du champ magnétique reste constante, la force électromotrice doit être proportionnelle à la vitesse de rotation. De nombreuses expériences, faites par divers savants, ont démontré l'exactitude de cette proposition, entre certaines limites, pour les machines dans lesquelles l'excitation magnétique est indépendante du circuit principal, c'est-à-dire pour les machines magnéto et les dynamos excitées extérieurement. Elle n'est cependant absolument exacte que si la résistance du circuit augmente proportionnellement à la vitesse¹, parce que le courant dans les spires induites elles-mêmes réagit sur le champ

1. Si l'on tient compte de cette condition, la règle subsiste également pour les dynamos en série, mais non pour les machines en dérivation. Toutefois si, dans ce dernier cas, la résistance des bobines en dérivation augmente aussi proportionnellement, la règle se maintient encore dans une certaine mesure.

magnétique et modifie la distribution des lignes de force. Cette réaction a pour effet, d'abord, de faire varier la position du « diamètre de commutation » ; et, en second lieu, de réduire le nombre effectif des lignes de force. Il en résulte qu'avec une résistance constante en circuit, la force électromotrice et, par suite, le courant sont un peu moindres à de grandes vitesses que ne le comporterait le rapport des vitesses. D'ailleurs, l'action retardatrice due à la self-induction dans les sections élémentaires de l'armature augmente avec la vitesse, et se traduit par une résistance de l'armature *en apparence* plus élevée à de grandes qu'à de faibles vitesses (voir les courbes au Chapitre XVII). De ce que le produit du courant par la force électromotrice donne un nombre proportionnel au travail électrique, il s'ensuit que, pour des machines « à excitation indépendante », le travail électrique accompli dans un temps donné est à peu près proportionnel au carré de la vitesse ; par suite, le travail demandé à la machine à vapeur sera également proportionnel au carré de la vitesse.

Dans les machines auto-excitatrices, disposées soit en « série », soit en « dérivation », la loi n'est plus du tout la même. Si le fer des électro-aimants n'arrive pas à une aimantation voisine du point de saturation, l'accroissement de courant, conséquence de l'augmentation de vitesse, produira une augmentation dans l'intensité du champ magnétique ; cet accroissement réagira sur la force électromotrice et l'amènera à être plus sensiblement proportionnelle au carré de la vitesse, qui, à son tour, déterminera une augmentation du courant dans la même proportion. L'aimantation du fer, même éloignée du point de saturation, n'étant pas exactement proportionnelle à l'action magnétisante, mais un peu moindre, on trouve pratiquement que le travail électrique de la machine n'est pas proportionnel à la quatrième, ni même à la troisième puissance de la vitesse, mais à une valeur un peu inférieure à cette dernière.

Des considérations mécaniques empêchent de donner aux parties mobiles une trop grande vitesse ; il est donc évident que, s'il y a une vitesse-limite, imposée par la question de sécurité, à la rotation d'une armature donnée, on obtiendra la plus grande somme de travail à cette vitesse en employant des aimants aussi

énergiques que possible, des électro-aimants de préférence à des aimants d'acier.

Il est d'ailleurs absolument essentiel pour un grand nombre d'applications que la dynamo produise et maintienne les courants à un « potentiel » (ou « pression », comme on dit quelquefois) constant, de telle sorte que les lampes par exemple, s'il s'agit d'éclairage, restent, quel qu'en soit le nombre en circuit, à un degré constant d'incandescence. A cet effet, différents modes d'auto-régulation ont été imaginés; le plus satisfaisant de tous est l'enroulement *compound* des électro-aimants de la dynamo que nous étudierons longuement dans la suite de cet ouvrage.

Mais dans toutes ces combinaisons tout dépend de cette condition que la vitesse d'entraînement soit uniforme. Aussi, dans une application électrique bien installée le moteur à gaz doit-il être banni comme source de puissance mécanique en raison de son extrême irrégularité de vitesse. Même avec les meilleures machines à vapeur, il faut une valve d'admission d'une sensibilité spéciale, et il est probable que dans l'avenir ces valves seront actionnées électriquement et automatiquement par le système électro-magnétique lui-même. Dans tous les cas où la vitesse d'entraînement est exposée à des irrégularités, il est une simple et naturelle précaution tout indiquée : c'est de mettre un volant d'un certain poids sur l'arbre de la dynamo. Il est vraiment singulier qu'on n'ait pas plus souvent recours à ce moyen.

CHAPITRE III

ORGANES DES MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES

Pour donner plus de clarté aux considérations que nous aurons à développer dans l'étude des divers types de dynamos pris individuellement, nous commencerons par examiner quelques points fondamentaux du mécanisme général et des organes des machines dynamos ; nous nous occuperons spécialement de celles de la Classe I qui comprend la grande majorité des machines employées aujourd'hui. Nous serons ainsi directement conduits à un examen plus approfondi de la construction et de l'objet de leurs divers organes constitutifs et essentiels à leur fonctionnement.

Dynamo élémentaire idéale.

La plus simple dynamo qu'on puisse concevoir est représentée par la figure 14. Elle consiste en une simple boucle ou spire rectangulaire de fil tournant dans champ magnétique simple et uniforme, entre les pôles d'un grand aimant. Si l'on commence par placer la boucle dans le plan vertical, le nombre des lignes de force qui la traversent de droite à gauche sera maximum ; puis il diminuera pour tomber à zéro à mesure que dans sa rotation la spire avancera vers la position horizontale ; mais la continuation du mouvement laissera pénétrer ensuite dans l'intérieur de la boucle les lignes de force en sens inverse, ce qui déterminera un maximum négatif quand la boucle aura tourné de 180 degrés. Pendant cette demi-

révolution des courants auront été ainsi induits dans la boucle; ces courants seront d'avant en arrière dans la partie de la boucle qui s'élève sur la gauche, et de sens contraire, c'est-à-dire d'arrière en avant, dans la partie qui descend sur la droite. Au moment où elle passera par la position correspondant à 180 degrés de son point de

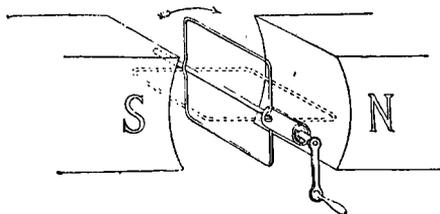


FIG. 14. — Dynamo élémentaire idéale.

départ il y aura commencement d'induction en sens inverse, car alors le nombre de lignes de force négatives diminue, ce qui équivaut à une augmentation positive du nombre de lignes de force; et cette augmentation continuera jusqu'à ce que la boucle soit revenue à sa première position après avoir effectué une rotation complète. Pour transformer ces courants alternativement de sens contraire en un courant de même sens dans le circuit extérieur, il faut employer un commutateur formé d'un tube métallique fendu longitudinalement en deux parties et monté sur un cylindre de bois dur ou autre matière isolante convenable, chacune des moitiés de ce tube étant reliée à l'une des extrémités de la boucle, comme l'indique la figure 14. Contre ce commutateur vient presser une paire de ressorts métalliques ou « balais » (fig. 15) qui recueillent les courants pour les conduire dans le circuit extérieur. Il est évident que si les balais sont disposés de telle sorte que l'une des parties du tube fendu échappe du balai et que l'autre arrive en contact avec lui au moment où la boucle occupe les positions correspondant au renversement d'induction, les courants alternatifs induits dans la boucle seront « commués » en un courant d'une seule et même direction dans le circuit. On doit s'attendre en conséquence à ce que les balais soient placés de manière qu'il y ait commutation



FIG. 15.
Commutateur ou Collecteur en deux parties.

juste au moment où la boucle passe par la position verticale. La pratique montre cependant que le *calage* des balais doit être légèrement avancé dans le sens du mouvement pour des raisons que nous exa-

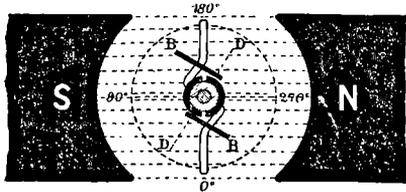


FIG. 16. — Spire unique dans un champ magnétique simple.

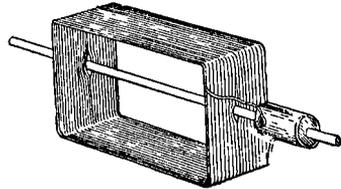


FIG. 17. — Bobine rectangulaire simple.

minerons. La figure 16 représente les balais BB déplacés de manière à toucher le commutateur non pas exactement aux points le plus élevé et le plus bas, mais en des points déviés dans la direction de la ligne DD qu'on nomme le « diamètre de commutation ». Le raisonnement ne change pas si à la spire

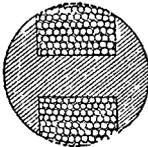


FIG. 18. — Section de l'ancienne bobine en navette ou en double T de Siemens.

idéale unique nous substituons la bobine simple rectangulaire représentée par la figure 17 et formée d'un grand nombre de tours de fil, dans chacun desquels se produit une action inductive simultanée, qui augmente proportionnellement la force électromotrice totale induite. Cette disposition, avec addition d'un noyau de fer, n'est autre que la forme primitive donnée aux armatures en 1855 par MM. Siemens, dont la figure 18

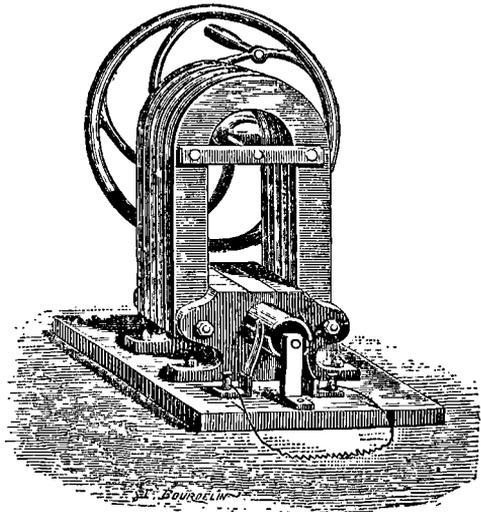


FIG. 19. — Machine primitive de Siemens à armature en navette et aimants permanents.

représente en section l'armature en forme de navette ou en double T. On voit dans la figure 19 une petite machine magnéto-électrique du type primitif munie de cette armature. Bien que cette forme soit abandonnée depuis un certain nombre d'années, sauf pour les petits moteurs et autres appareils du même genre, elle a donné un grand élan aux machines de son temps; pour toutes les machines à grand travail elle est aujourd'hui remplacée par les armatures en forme d'anneau et de tambour que nous allons maintenant décrire.

Systeme Induit ou Armatures.

Revenant à la spire unique idéale, on voit un peu plus clairement dans la figure 20 ses liaisons avec le commutateur en deux parties. Le même tube fendu ou commutateur en deux parties

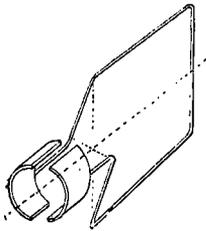


FIG. 20. — Armature à spire unique.

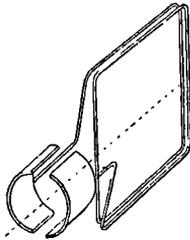


FIG. 21. — Armature à deux spires.

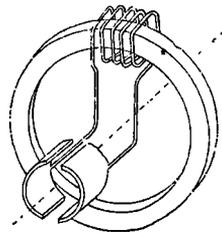


FIG. 22. — Armature annulaire simple à bobine unique.

suffit si l'on substitue à la spire unique une boucle formée de deux ou plusieurs tours telle que l'indique la figure 21.

Mais nous pouvons également remplacer la spire unique par une petite bobine formée de plusieurs tours enroulés sur un anneau de fer. Cette bobine (fig. 22), qui peut être considérée comme une section d'anneau Pacinotti ou Gramme, sera pénétrée aussi bien que la spire par des lignes de force induites. Dans la position indiquée, elle occupe le point le plus élevé de sa course auquel correspond l'induction maxima des lignes de force qui agissent sur elle. A mesure qu'elle tourne, le nombre des lignes de force qui la pénètrent diminue pour tomber à zéro quand elle est à 90 degrés de sa position primitive. Mais il suffit de s'arrêter un in-

stant sur l'action dont elle est le siège pour voir que, si une autre bobine occupe sur le côté opposé de l'anneau une position diamétrale, elle sera soumise au même moment à une action inductive exactement semblable et pourra par suite être reliée au même commutateur. Si ces deux bobines sont réunies parallèlement (en arc multiple), comme l'indique la figure 23, leur force électromotrice conjuguée sera identique à celle due à l'une quelconque d'entre elles séparément; mais la résistance qu'elles présenteront au courant dans ces conditions sera moitié de celle offerte par chacune d'elles individuellement. Il est évident que l'on peut réunir de la même manière à un simple collecteur en deux parties deux boucles du pre-

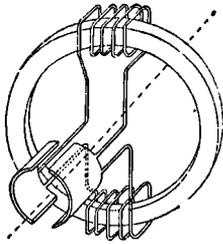


FIG. 23. — Armature annulaire simple à deux bobines reliées parallèlement.

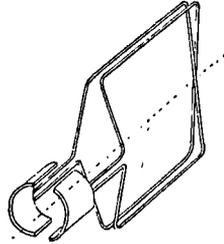


FIG. 24. — Armature simple à deux spires parallèles.

mier type reliées parallèlement. Si les deux boucles ont chacune un seul tour, nous aurons la disposition schématiquement représentée par la figure 24; et ce mode de connexion sera également applicable à des boucles formées chacune de plusieurs spires.

Mais toutes ces dispositions qui comportent l'emploi d'un commutateur en deux parties, reliant, soit en un seul circuit, soit en deux circuits parallèles, les bobines qui y aboutissent, présentent cet inconvénient que les courants, bien que ramenés dans une seule direction, ne sont pas absolument continus. Dans une bobine unique quelconque sans commutateur, les révolutions successives engendreraient des courants dont les variations pourraient, si elle était exempte d'induction sur elle-même (*self-induction* ou *auto-induction*), être graphiquement exprimées par une sinusoïde récurrente, comme dans la figure 25. Mais si, par l'addition d'un simple commutateur formé d'un tube fendu, on redresse les moitiés ren-

versées de ces courants, de manière à leur donner le même sens dans le reste du circuit, les courants résultants, sans être continus, seront seulement de même signe, comme l'indique la figure 26, deux courants étant engendrés pour chaque révolution de la bobine.



FIG. 25.

Les courants sont ainsi « rectifiés », ou « redressés », comme on dit sur le Continent, mais ne sont pas continus. Pour obtenir



FIG. 26.

cette *continuité* des courants, il faut procéder du simple commutateur en deux parties à une forme de commutateur formé d'un plus grand nombre de sections et employer en même temps un plus grand nombre de bobines élémentaires. Les bobines doivent également être disposées de telle sorte que l'une entre en activité quand l'autre devient inactive. D'après cela, si l'on fixe sur un anneau de fer deux jeux de bobines situés dans des plans perpendiculaires entre eux, comme l'indique la figure 27, de telle sorte que l'un arrive à sa position de maximum d'action quand l'autre est dans la position d'action minima (l'un étant normal aux lignes de force, pendant que l'autre leur est parallèle), et si leurs actions se superposent, on arrivera au résultat indiqué par la figure 28, qui présente un courant continu, mais ondulatoire, avec quatre légères ondulations par tour. Si l'on emploie un plus grand nombre de bobines élémentaires, dont les actions, se produisant à intervalles réguliers, se superposent, on obtiendra une courbe analogue, mais dont les sommets seront relativement plus nombreux et moins saillants. Si le nombre des bobines employées est très considérable et le

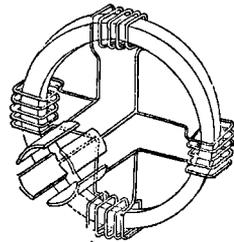


FIG. 27. — Armature en anneau à quatre sections.

recouvrement des courbes encore plus complet, la série des sommets formera pratiquement une ligne droite, c'est-à-dire qu'au point de vue pratique le courant total sera constant.

On trouvera à cet égard au Chapitre X, dans la théorie algébrique, des observations importantes ainsi que le calcul relatifs à la valeur de ces ondulations dans des armatures divisées en un nombre

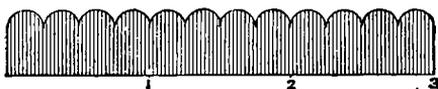


FIG. 28.

donné de sections. Pour une parfaite uniformité d'effet les spires de l'armature doivent être divisées en un très grand nombre de sections, et ces sections doivent être disposées de manière à venir

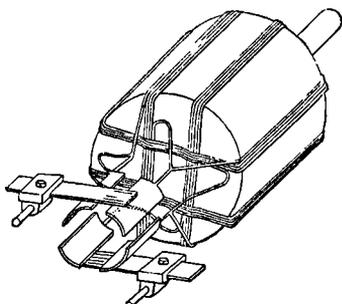


FIG. 29. — Armature cylindrique à quatre sections.

l'une après l'autre à intervalles égaux et par une succession régulière dans la position d'induction maxima. La figure 29 donne le schéma d'une armature cylindrique formée de deux paires de bobines élémentaires à angles droits l'une par rapport à l'autre et reliées à un collecteur à quatre sections. Il suffit de jeter les yeux sur les figures 27 et 29 pour voir que chacune des bobines élémentaires est reliée

à sa voisine, d'où résulte un circuit continu à travers la totalité des spires de l'armature. Ainsi, la fin d'une section et le commencement de sa voisine se trouvent reliés à une même lame du collecteur. Dans la pratique, les segments du collecteur ne sont pas de simples tranches de tube métallique; ils sont formés d'un certain nombre de lames parallèles en cuivre, bronze ou bronze phosphoreux, comme on peut le voir sur la figure 96, p. 143, circulairement disposées à la périphérie et suivant les génératrices d'un cylindre de matière isolante quelconque. Il est à noter également que, grâce à ce que le circuit est absolument continu autour de l'armature, deux voies sont ouvertes au passage du cou-

rant d'un balai à l'autre à travers les armatures soit cylindriques, soit en anneau, dont les figures 27 et 29 peuvent d'ailleurs être considérées comme les types simplifiés. Le raisonnement que nous venons de faire pour les armatures à quatre sections s'applique également à celles qui en ont un plus grand nombre. Nous y reviendrons plus longuement dans le chapitre relatif aux divers types de machines. Il nous suffira de dire ici que, dans toutes les armatures analogues soit en « anneau » soit en forme de « cylindre », il doit y avoir autant de segments au commutateur, ou « collecteur » comme on l'appelle parfois, qu'il y a de bobines élémentaires dans les

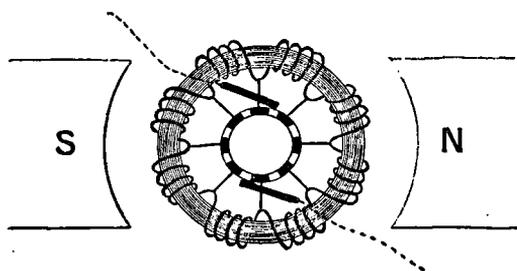


Fig. 30. — Armature simple en anneau montrant les connexions.

spires de l'armature¹. La figure 30 montre la disposition dans le cas d'une armature en anneau à huit sections.

Ainsi que nous l'avons déjà dit, les « balais » pressent contre le commutateur ou collecteur, maintenus généralement dans la position voulue à l'aide d'un ressort. A mesure que le collecteur tourne, chaque lame passe successivement sous le balai et entre en contact avec lui. D'un côté, — c'est-à-dire du côté vers lequel marchent les deux courants dans l'armature, — le courant passe de la lame du collecteur au balai. De l'autre côté, le courant de retour s'écoule du balai négatif au collecteur en contact avec lui pour se partager de là en deux parties à travers les deux circuits de l'armature. Si les balais appuient énergiquement contre les lames du collecteur, il arrive que, l'une de ces lames quittant le balai et la suivante venant en contact avec lui, le contact se trouve un instant établi

1. Il n'y a qu'un petit nombre d'exceptions pour certaines machines spéciales dans lesquelles deux ou plusieurs sections de l'armature sont reliées entre deux lames consécutives du collecteur.

entre deux lames voisines; la bobine élémentaire ou section dont les extrémités sont reliées à ces deux lames est ainsi momentanément mise en court circuit. Nous examinerons plus loin ce qui en résulte relativement aux réactions dans les armatures.

Nous n'avons considéré jusqu'ici que les deux types d'armatures « cylindriques » et « en anneau » ; ce ne sont cependant pas les seules dispositions possibles. L'objet commun de toutes les combinaisons de bobines est d'obtenir la continuité et l'égalisation pratiques de courant dont nous avons parlé plus haut. Pour atteindre ce but, il est indispensable qu'une partie des bobines élémentaires arrive à la position d'action maxima pendant que d'autres passent au point neutre et sont momentanément inactives. Cette condition exige une disposition symétrique des bobines élémentaires ou groupes de bobines autour d'un axe; et cette disposition peut affecter l'une des quatre formes typiques qui suivent :

1). *Armatures en anneau*, dans lesquelles les bobines sont groupées sur un anneau dont l'axe principal de symétrie est également l'axe de rotation.

2). *Armatures cylindriques ou en forme de tambour*, dans lesquelles les spires sont enroulées longitudinalement sur la surface d'un cylindre ou tambour.

3). *Armatures polaires*, dont les spires sont enroulées sur des pôles séparés formant rayons à la périphérie d'un disque ou moyeu central.

4). *Armatures en disques*, dans lesquelles les spires sont aplaties sur un disque. Ces armatures sont spéciales aux dynamos de la Classe II.

Dans la pratique, les armatures en forme d'anneau sont adoptées dans les machines Pacinotti, Gramme, Schuckert, Gülcher, Fein, Heinrich, de Méritens, Brush, Jürgensen et autres. Les armatures cylindriques se rencontrent dans les machines Siemens (Altneck), Edison, Hipp, Elphinstone-Vincent, Weston et autres. Les armatures polaires sont employées dans les machines Allan, Elmore, et Lontin. Il existe plusieurs autres dispositions intermédiaires. L'armature Bürgin se compose de 8 ou 10 anneaux montés parallèlement, de manière à former un cylindre. Dans la machine

Lontin, à courant continu, les pôles sont fixés radialement sur la surface d'un cylindre creux roulé comme un anneau Gramme; cette machine contient, par suite, une grande quantité de fil inutile à la surface interne de l'anneau; l'excellente machine récemment construite par MM. Crompton et Kapp a le même genre d'armature. Dans la machine Weston, la surface du cylindre est découpée en sections longitudinales formant autant d'épanouissements de pôles radiaux; l'armature Jablochhoff lui ressemble, mais les épanouissements des pôles radiaux sont obliques par rapport à l'axe autour duquel ils sont disposés en hélice.

Les armatures en forme d'anneau figurent dans un grand nombre de machines; mais l'attention des inventeurs s'est spécialement portée sur les trois points suivants: assurer pratiquement la continuité du courant; prévenir le développement des courants de Foucault dans les noyaux des armatures; et réduire, autant que possible, les résistances inutiles. Dans la majeure partie de ces machines, les bobines élémentaires formant les sections de l'anneau sont couplées en série, c'est-à-dire que l'extrémité de l'une est reliée au commencement de l'autre, de manière à former un circuit continu tout autour de l'anneau, ces bobines élémentaires étant reliées deux à deux à une lame ou à un segment du collecteur. La plupart des inventeurs se sont contentés d'assurer, autant que possible, la continuité du courant en multipliant le nombre des sections. Parmi eux, M. le professeur Perry a fait un anneau dont les bobines élémentaires sont roulées obliquement, de telle sorte que l'une arrive au point neutre avant que la précédente l'ait quitté. Je ne doute pas des avantages de cette disposition, mais elle présente des difficultés mécaniques de construction. Dans la machine originaire de Pacinotti, les spires étaient enroulées entre des dents en saillie sur un anneau de fer. M. Gramme a laissé de côté cette denture, préférant l'enroulement direct sur toute la surface du noyau sans fin. Pour empêcher le développement de courants parasites dans les noyaux, M. Gramme a employé, pour cette partie de l'armature, un faisceau annulaire formé d'un grand nombre de tours de fil de fer vernissé. Dans la machine Gülcher, l'âme de l'anneau est formée de disques plats très minces, découpés dans de la tôle et munis de dents en saillie sur la circon-

férence; ces disques sont serrés les uns contre les autres. Le même mode de construction est adopté dans la dynamo Schuckert-Mordey (Victoria).

Dans les armatures annulaires, les portions de spires qui passent à l'intérieur de l'anneau sont relativement inactives (en dépit de la théorie ingénieuse du regretté Ant. Breguet, qui a cherché à prouver qu'une portion des lignes de force se recourbait vers cette région et rentrait à l'intérieur de l'anneau). Ces portions de spires coupent dans la rotation un très petit nombre de lignes de force et présentent, par suite, une résistance inutile. Divers inventeurs ont essayé de réduire cette source de perte soit en modifiant spécialement, à cet effet, les pièces polaires (comme dans la ma-

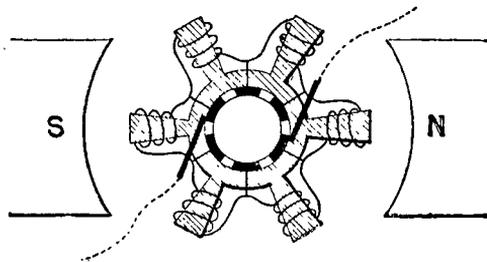


FIG. 31. — Armature polaire simple montrant les connexions.

chine de Fein et dans celle d'Heinrich), soit en employant des électro-aimants internes (comme dans la dynamo de Jürgensen), ou bien encore en aplatissant l'anneau en forme de disque, de manière à réduire, autant que possible, les portions internes des spires de l'anneau. Cette dernière disposition est adoptée dans les dynamos de Schuckert et de Gülcher. En réalité, les armatures en forme d'anneau plat peuvent être regardées comme un type distinct de celles dans lesquelles l'anneau tend vers la forme cylindrique.

Les armatures « polaires », à bobines roulées sur des pôles disposés en projections radiales, ont été imaginées par Allan et par M. Lontin; elles sont également employées dans quelques-unes des dynamos d'Elmore et dans certaines formes de machines à courants alternatifs, y compris celle de M. Gramme et la grande dynamo Mechwart-Zipernowsky exposée à Vienne en 1883. Le principe de la machine Lontin, dont les bobines sont reliées

entre elles comme les sections d'un anneau Pacinotti ou Gramme, est indiqué dans la figure 31. Ici le diamètre de commutation est parallèle au diamètre polaire, c'est-à-dire à la ligne joignant les pôles inducteurs; dans ce cas, en effet, le nombre des lignes de force est maximum pour les bobines qui occupent les positions droite et gauche. Cette armature est d'une construction difficile, parce qu'elle n'est pas assez robuste au point de vue mécanique si les noyaux ne sont pas massifs; et des noyaux massifs sont une mauvaise condition au point de vue électrique, à cause de l'échauffement qui s'y produit. Cette forme ne se prête pas non plus à une grande multiplication des sections, et les bobines, en raison de leurs positions relatives, se contrarient mutuellement dans leur action. Pratiquement, cette forme d'armature est abandonnée.

Ames des Armatures.

a.) — La théorie indique que, si l'on emploie du fer dans les armatures, ce fer doit être fendu ou en feuilles minces de manière à prévenir la production de courants parasites. Ces âmes de fer doivent être, dans leur structure, divisées en plans normaux aux circuits autour desquels est induite la force électromotrice, ou en plans parallèles aux lignes de force et à la direction du mouvement. Ainsi, les âmes des armatures cylindriques doivent être formées de disques en tôle mince. Dans les armatures en anneau, du type cylindrique ou allongé, les âmes doivent être constituées d'anneaux de tôle estampés et serrés les uns contre les autres; mais celles en forme d'anneau plat doivent être formées de cercles concentriques. Des âmes en fil de fer vernissé ou composées de disques de tôle mince séparés par du vernis, du carton d'amiante, ou du mica répondent en partie aux conditions requises. La discontinuité magnétique des âmes en fil offre cependant certains inconvénients; il est préférable que le fer ne présente pas de solution de continuité dans le sens où il doit s'aimanter. Il doit donc être plutôt en lames minces qu'en fil. Toutefois les âmes de fil s'imposent dans les armatures polaires; c'est une des raisons d'infériorité de ce mode de construction. Les âmes en fer massif sont

absolument inadmissibles, en raison des courants qui y prennent naissance et les échauffent. L'armature Wallace-Farmer, dont les bobines élémentaires étaient montées sur un disque de fer massif, s'échauffait fortement à l'usage. Quant aux âmes massives en métal autre que le fer, — tel que le bronze ou le bronze phosphoreux, — elles ne doivent sous aucun prétexte être employées dans une armature.

b.) — Les âmes des armatures doivent être disposées de telle sorte que le sens de la polarité de leur aimantation ne se renverse jamais *subitement* pendant la rotation. La négligence de cette précaution détermine l'échauffement des noyaux. C'est là le défaut des armatures du type de Niaudet.

c.) — Il faut qu'il y ait assez de fer dans l'armature pour qu'il soit exactement porté au degré critique de saturation magnétique quand la dynamo fournit son courant maximum.

Spires et Bobines des Armatures.

d.) — Toute résistance inutile des spires de l'armature doit être évitée comme nuisible au rendement de la machine. Les fils doivent, en conséquence, être aussi courts et aussi gros que le comporte la force électromotrice à obtenir, sans nécessiter une vitesse de rotation trop considérable. Dans certaines dynamos pour lesquelles la résistance de l'armature doit être maintenue aussi faible que possible, — comme dans quelques machines Siemens destinées à l'électro-métallurgie, — plusieurs fils conduits simultanément sont réunis parallèlement par leurs extrémités. Il est en effet plus facile d'enrouler quatre fils l'un à côté de l'autre que d'enrouler un seul fil très gros et présentant peu de souplesse.

e.) — Théoriquement, la fonction des spires de l'armature étant d'embrasser des lignes magnétiques de force, la meilleure forme à leur donner est celle qui, pour la moindre longueur de fil, donne la plus grande surface, c'est-à-dire un cercle. Dans la machine américaine Houston-Thomson¹, l'armature est sphérique et ses bobines élémentaires sont circulaires; de même dans certaines armatures en anneau la section de l'anneau est circulaire.

1. Voir *La Lumière électrique*, t. XV, p. 398.

Une armature cylindrique, dont la section longitudinale est rectangulaire, doit être aussi large que longue de manière à présenter une surface maxima avec une longueur minima. Des considérations de construction paraissent néanmoins indiquer des dimensions longitudinales supérieures.

f.) — La conductibilité du fil doit être aussi élevée que possible. La conductibilité du bon cuivre est si voisine de celle de l'argent (plus de 96 p. 100), qu'il est inutile d'employer du fil d'argent dans la construction des bobines d'armature des dynamos ¹.

g.) — Dans le cas où l'on se sert de barres ou de bandes de cuivre, au lieu de simples fils, il faut avoir soin, pour éviter les courants de Foucault, d'employer ces conducteurs en lames minces ou de les fendre en plans parallèles à la force électromotrice, c'est-à-dire en plans perpendiculaires aux lignes de force et à la direction du mouvement ².

h.) — Nous avons vu que, pour diminuer les ondulations du courant, l'armature mobile doit être divisée en un grand nombre de sections ou bobines élémentaires, venant chacune par une succession régulière dans la position d'action maxima. Si ces sections ou bobines sont indépendantes l'une de l'autre, chacune d'elles ou chaque paire de sections diamétralement opposées doit avoir son commutateur spécial (comme dans la machine Brush). Si elles ne sont pas indépendantes, mais bien toutes roulées en connexion continue autour de l'armature, il suffit d'un collecteur formé de lames métalliques, parallèles, en nombre égal à celui des sections, et communiquant chacune avec la fin d'une section et le commencement de la suivante.

i.) — Dans tous les cas, les connexions de ces sections et des commutateurs ou collecteurs doivent être symétriquement disposées par rapport à l'axe; s'il en était autrement, il y aurait inégale

1. On trouve aujourd'hui dans le commerce français des fils de cuivre électrolytique dont la conductibilité est supérieure à celle de l'étalon primitivement adopté et qui auraient par rapport à cet étalon une conductibilité égale à 102 pour cent, soit pratiquement celle de l'argent. (*N. du T.*)

2. Il est à remarquer que la règle pour l'élimination des courants de Foucault est différente dans les trois cas, c'est-à-dire selon qu'il s'agit des électro-aimants et de leurs pièces polaires, ou du mouvement de l'âme de fer de l'armature, ou bien encore du mouvement de ses éléments conducteurs.

induction dans les parties qui occupent successivement les mêmes positions relativement aux électro-aimants, et il en résulterait des inégalités dans la force électromotrice, des étincelles au commutateur ou au collecteur, et d'autres irrégularités.

j.) — Dans le cas où les spires fonctionnent en série, il est avantageux de disposer le commutateur de manière à laisser hors du circuit la bobine qui se trouve dans la position d'action minima, car on retire ainsi du circuit la résistance d'une spire inutile. Mais il ne faut pas, à cet effet, la mettre en court circuit, autrement les effets nuisibles de self-induction dans la partie mise en court circuit se manifesteraient promptement par un échauffement anormal. Quand, au contraire, les spires fonctionnent en circuit parallèle, la mise hors circuit d'une spire inutile augmente la résistance, mais ce résultat peut être précieux pour éviter l'échauffement provenant des courants excessifs que lui envoient les spires actives.

k.) — Quand il s'agit d'armatures polaires, les spires doivent être réparties sur les pôles, de préférence aux parties médianes des noyaux; les variations dans le magnétisme induit sont, en effet, plus sensibles aux pôles ou dans leur voisinage (voir page 42).

l.) — Comme il est impossible de réduire à zéro la résistance des spires de l'armature, on ne peut empêcher une production de chaleur dans ces spires pendant le mouvement. Aussi est-il prudent de laisser entre les spires, dans l'enroulement, un espace où l'air circule librement, pour amener leur refroidissement par la ventilation.

m.) — L'isolement des spires de l'armature doit être assuré avec un soin tout particulier et poussé aussi loin que possible au moyen de mica, d'amiante ou autre substance non susceptible de brûler ou de fondre en cas d'échauffement de ces spires.

n.) — Il faut avoir soin que les spires des armatures soient roulées et maintenues de manière à ne pas s'écarter de leur position sous l'action du mouvement. On a vu des armatures se dépouiller de leur enveloppe isolante et même voler en morceaux faute des précautions mécaniques les plus élémentaires.

o.) — Les armatures doivent être soigneusement équilibrées sur leurs axes; autrement, vu leur grande vitesse de rotation, il y aurait des vibrations nuisibles et tendance au cintrage des arbres. De là la nécessité d'une parfaite symétrie dans l'enroulement.

Nous aurons à nous appesantir sur d'autres considérations relatives aux réactions entre l'armature et le système inducteur quand nous aurons passé en revue les règles qui président à la constitution de ce système inducteur.

Système Inducteur ou Electro-aimants.

On ne peut pas construire de bobines d'électro-aimants de machines dynamos sans résistance. Ces bobines absorbent toujours par conséquent, sous forme de chaleur, une partie de l'énergie des courants. On en a déduit qu'au point de vue économique les électro-aimants n'étaient pas comparables aux aimants permanents en acier, qui n'ont besoin d'être aimantés qu'une fois pour toutes. Il y a cependant certaines considérations qui militent en faveur des électro-aimants. A puissance égale, leur prix coûtant est inférieur à celui des aimants en acier, qui, d'ailleurs, ne sont pas permanents et ont besoin d'être réaimantés à certains intervalles. De plus, ainsi que nous l'avons vu, l'existence d'une vitesse-limite, qu'il n'est pas sage de dépasser, nécessite, si l'on ne veut pas arriver à des dimensions excessives de machines, l'emploi de champs magnétiques aussi énergiques que possible. Mais si l'on n'obtient pas l'aimantation pour rien, et que l'on trouve plus avantageux de dépenser une partie du courant sur les électro-aimants, l'économie exige qu'on les construise de telle façon que leur aimantation coûte aussi peu que possible. L'aimantation d'un morceau de fer entraîne une dépense d'énergie; mais, une fois qu'il est aimanté, le maintien de cette aimantation n'en exige plus (sauf pour la compensation de la légère perte due à l'échauffement des bobines, et qu'on peut réduire en donnant à celles-ci aussi peu de résistance que possible), si l'électro-aimant n'effectue aucun travail. Même en dehors de tout travail, l'inconstance seule du courant excitateur suffit à déterminer une perte. S'il y a un travail effectué, tel que l'attraction d'un morceau de fer, il se produit alors immédiatement, dans les bobines, un appel correspondant d'intensité de courant pour la production de l'énergie nécessaire. L'expérience suivante met ce fait en évidence.

Faisons traverser par un courant provenant d'une source constante (fig. 32) en même temps qu'une lampe à incandescence un électro-aimant soumis à son action magnétisante. Une fois établi, le courant est parfaitement fixe, et aucune partie de son énergie n'est dépensée sur l'électro-aimant (sauf une fraction négligeable, due à la résistance des bobines). Mais si l'on demande à l'électro-aimant un travail en lui présentant un barreau de fer à attirer, la lumière de la lampe s'affaiblit momentanément. Si l'on retire vivement en arrière la barre de fer, on constate au contraire un accroissement momentané d'intensité dans la lumière, qui reprend d'ail-

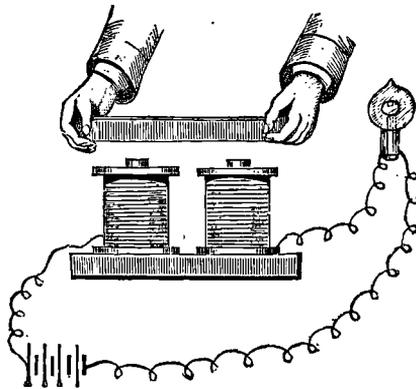


FIG. 32. — Réaction d'une Masse de fer en mouvement sur un Electro-aimant.

leurs dans chaque cas son intensité primitive dès que le mouvement cesse.

Dans une dynamo, où se trouvent souvent en mouvement des parties contenant du fer, il est important que l'approche ou l'éloignement de ces masses de fer ne produise pas des réactions analogues à celles que nous venons de constater dans le magnétisme de l'électro-aimant. Les grands électro-aimants à action lente sont, par suite, ceux qui conviennent le mieux. Nous résumons ci-dessous les conditions requises pour atteindre le résultat voulu.

p.) — Le corps des électro-aimants doit être massif. Des courants sont induits dans le fer même et circulent autour de lui chaque fois que l'intensité du magnétisme se modifie. Ces courants d'induction tendent à retarder tous les changements dans le degré

d'aimantation. Leur intensité est proportionnelle au carré du diamètre de l'électro-aimant, s'il est cylindrique, ou à la surface de sa section droite. Un *gros* électro-aimant aura, par suite, une action lente, et donnera de la fixité au courant induit dans le champ qu'il produit.

q.) — Les électro-aimants doivent contenir *une grande quantité de fer*. La masse de fer est importante au point de vue du retard qu'elle apporte à la saturation.

r.) — L'emploi du *fer le plus doux possible* dans la confection des électro-aimants se recommande non pas en raison de ce que le fer doux s'aimante et se désaimante plus rapidement que tout autre (ce qui n'est pas ici un avantage), mais parce que le fer doux possède une capacité magnétique plus grande, et n'arrive pas aussi vite à l'état de saturation. On ne saurait attacher trop d'importance à ce point. Une petite dynamo construite en fer tout à fait supérieur produira autant de travail, et ce à une moindre vitesse, qu'une machine beaucoup plus grande faite en fer ordinaire.

s.) — Il faut employer de *longs* électro-aimants. Leur avantage est de donner encore de la fixité au magnétisme, et, par suite, de la constance au courant. L'aimantation et la désaimantation d'un long électro-aimant demandent plus de temps que celles d'un électro-aimant plus court. L'un coûte, il est vrai, plus cher que l'autre, et a besoin de plus de fil sur ses bobines extérieures; mais le fil peut être relativement plus gros et offrir ainsi moins de résistance. Il y a naturellement une limite pratique à la longueur; car si un électro-aimant est trop long proportionnellement à sa grosseur, les lignes de force induites par les bobines, au lieu de passer toutes du fer aux pièces polaires, s'échappent par les côtés.

t.) — Les noyaux de fer doivent avoir une section transversale telle qu'il y ait le plus de fer possible enveloppé par les bobines. On pourrait croire que la section transversale la plus avantageuse est la forme circulaire; mais l'expérience a prouvé que, si les noyaux circulaires sont très gros, les parties internes les plus profondes ne sont pas pénétrées par l'aimantation. Aussi un grand nombre de constructeurs préfèrent-ils des barres de fer de section rectangulaire, mais arrondies sur leurs bords.

u.) — Le magnétisme ainsi obtenu doit être utilisé aussi directe-

ment que possible, d'où la conséquence suivante, que les électro-aimants ou leurs pièces polaires doivent être aussi voisins de l'armature mobile que le comporte la sécurité de la rotation.

v.) — Les bords et angles vifs sont à éviter dans les électro-aimants et dans leurs pièces polaires, si l'on veut avoir un champ uniforme. Les lois de distribution des lignes de force magnétiques autour d'un pôle sont très sensiblement analogues à celles de la distribution de l'électrisation sur un conducteur. Dans le premier comme dans le second cas, il faut éviter les angles et les pointes. Si les électro-aimants ou leurs épanouissements polaires ont des angles vifs, le champ ne peut être uniforme, et une partie des lignes de force se répand inutilement dans l'espace environnant l'armature, au lieu de la traverser. Théoriquement, la meilleure forme à donner extérieurement à un électro-aimant est celle des courbes des lignes de force magnétiques.

w.) — Il est de la plus haute importance que l'action magnétisante du système inducteur sur l'âme de fer de l'armature soit de beaucoup supérieure à celle que développe le courant produit dans les spires mêmes de cette armature. Si celle-ci est relativement puissante, le calage des balais devra être très incliné, et il en résultera beaucoup d'étincelles au collecteur. L'angle de calage des balais et ses variations suivant la charge de la machine peuvent être réduits, ce qui tend à diminuer la tendance à la production d'étincelles, par la puissance considérable donnée aux inducteurs relativement à celle de l'armature.

x.) — On renforce le champ magnétique en mettant du fer, ou bien encore des électro-aimants, à l'intérieur de l'armature. On y parvient tantôt en munissant les bobines de l'armature de noyaux de fer qui se meuvent avec elles; tantôt en laissant fixes les noyaux ou les masses internes de fer. Dans le premier cas, il y a perte par échauffement; le second présente des difficultés de construction. MM. Siemens ont employé une masse immobile à l'intérieur de leur armature cylindrique. Les électro-aimants intérieurs, ayant pour fonction de concentrer le magnétisme du champ, ont été employés par Lord Elphinstone et M. Vincent. Le même procédé est appliqué dans la dynamo « mouse-mill » de Sir W. Thomson, et dans la machine de Jürgensen.

y.) — Dans les cas où l'on ne cherche pas un champ magnétique uniforme, mais où, comme dans les dynamos de la seconde classe, l'intensité du champ doit être différente suivant les points, il peut être particulièrement avantageux d'employer des électro-aimants présentant des angles ou des pointes, de manière à concentrer le champ dans certaines régions

z.) — Il est extrêmement important que le fer ne présente dans sa structure aucune solution physique de continuité dans le sens où il doit être aimanté. Le grain du fer doit se trouver dans la direction des lignes de force magnétiques qui le traversent, la capacité magnétique maxima du fer forgé étant dans le sens de son grain. De plus, à toutes les surfaces des inducteurs destinées à former les surfaces polaires et où les lignes de force passent par conséquent du fer dans l'air, le grain du fer doit être de bout. Cette règle n'est

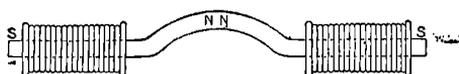


FIG. 33. — Inducteurs Siemens.

pas observée dans les machines Siemens qui comportent comme noyaux d'inducteurs des pièces cintrées en fer forgé, disposées, comme l'indique la figure 33, de manière à être aimantées à partir des deux extrémités avec un « pôle conséquent » au milieu de l'arc qu'elles forment. Ici les lignes de force suivent la direction du grain jusqu'au milieu et ont ensuite à s'échapper transversalement au grain du fer.

Le lecteur pourra remarquer le contraste qui existe entre le mode de disposition Siemens et celui adopté dans la dynamo d'Edison (fig. 100) qui se rapproche davantage de celui employé par Wilde en 1865 (voir fig. 3). La machine Gramme ordinaire a des pôles conséquents au milieu de chacun des électro-aimants (voir fig. 78 et 79). La double machine Gramme construite par M. Deprez est représentée par la figure 34. C'est une disposition bien préférable.

aa.) — Il y a grand avantage à faire ainsi fonctionner une machine autant que possible avec des circuits magnétiques fermés; c'est-à-dire avec un circuit de fer presque continu ramenant sur

elles-mêmes les lignes de force magnétiques en courbes fermées. Ce point de la plus haute importance a été relevé dès 1878 par Lord Elphinstone et M. C.-W. Vincent, dont la machine tend à réaliser ce principe. Tous les électriciens savent que si un courant électrique doit parcourir un circuit constitué en partie par du cuivre, en partie par des liquides, — tels que l'acide dans une pile ou la dissolution dans une cuve électrolytique, — la résistance du liquide est toujours beaucoup plus considérable que celle du cuivre. Même avec l'acide sulfurique étendu d'eau, la résistance présentée par une couche mince au passage du courant est 200 000 fois égale à celle que présenterait une couche de cuivre de même épaisseur.

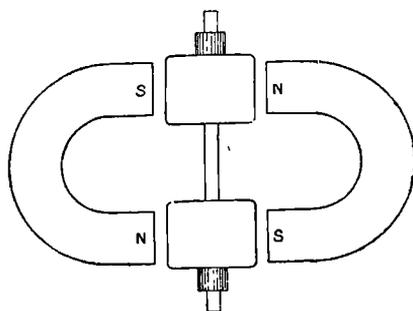


FIG. 34. — Inducteurs de la Double machine Gramme de M. Deprez.

Or, dans le cas analogue où un champ magnétique sert à aimanter le noyau de fer d'une armature, la couche d'air, — ou, si l'on veut, de fil de cuivre, — entre les deux pièces de fer offre ce que nous pouvons appeler une résistance relativement énorme à l'induction magnétique. Si l'on prend pour unité la perméabilité magnétique de l'air, celle du fer sera représentée par des valeurs oscillant, suivant qualité, entre 40 000 et 20 000 unités. La perméabilité du cuivre diffère peu de celle de l'air. En d'autres termes, une couche d'air ou de cuivre offre de 40 à 20 000 fois autant de résistance à l'induction magnétique que si l'espace entier était rempli de fer doux. Il y a donc naturellement tout avantage à diminuer autant que possible les jours entre les portions de fer dans le circuit. Les valeurs respectives de la perméabilité magnétique sont connues depuis des années pour le fer, l'air et le cuivre; et néanmoins cette

simple déduction de la théorie a été mise en doute dans la grande majorité des cas. Ceci prouve que l'anneau de Pacinotti, avec ses dents saillantes en fer, était, comme principe, d'une conception parfaite.

Pièces Polaires.

ab.) — Les pièces polaires doivent être massives et du fer le plus doux possible pour les mêmes raisons que nous avons précédemment développées.

ac.) — Leur forme doit être exactement adaptée au rôle qu'elles sont appelées à remplir. Si l'on veut obtenir un champ unique à peu près uniforme, elles doivent s'étendre latéralement, mais sans exagération. Dans le cas des dynamos à armatures en forme d'anneaux plats, l'expérience a démontré, comme nous le verrons plus loin, qu'une pièce polaire étroite est plus avantageuse qu'une large. La distribution de la force électromotrice dans les diverses sections ou bobines élémentaires qui composent l'armature dépend en grande partie de la forme des pièces polaires.

ad.) — Les pièces polaires doivent être construites de façon à éviter, autant que possible, le développement en elles des courants parasites de Foucault. La seule vraie manière de diminuer la perte due à cette cause est de les former de lames divisant la masse de fer en plans perpendiculaires à la direction des courants ou à celle de la force électromotrice qui tend à produire ces courants.

ae.) — Si les bâtis des dynamos sont en fonte, il faut avoir soin qu'ils ne mettent pas en court circuit les lignes de force magnétiques de pôle à pôle des électro-aimants. On peut, il est vrai, interposer des masses de laiton, de zinc ou autre métal non magnétique; mais c'est toujours une médiocre ressource. Une machine dynamo bien étudiée ne doit pas comporter d'expédients de ce genre.

Bobines des Electro-aimants.

af.) — Pour être dans de bonnes conditions, les bobines des électro-aimants doivent être aussi chargées de fil que possible en

leur milieu ; la distribution n'en doit pas être uniforme sur toute la longueur ¹, et encore moins renforcée vers les pôles. Il y a à cela un double motif. L'inspection de la figure 6 montre qu'un grand nombre des lignes de force d'un aimant *s'échappent* de chaque côté avant d'arriver à ses pôles, d'où elles devraient toutes émerger si la masse de l'aimant était magnétisée d'une façon parfaitement égale dans toute sa longueur. Intérieurement, l'aimantation du barreau est maxima en son milieu. C'est donc au milieu ou vers ce point qu'il faut accumuler les spires magnétisantes, de telle sorte que les lignes de force qu'elles déterminent traversent le plus de fer possible. La seconde raison pour ne pas placer les spires aux extrémités est la suivante : toute influence extérieure, susceptible de troubler le magnétisme d'un aimant ou d'affecter la distribution de ses lignes de force, agit sur les lignes de force voisines des pôles bien plus que sur celles situées en toute autre région. C'est pour cela que dans les téléphones Bell, et dans les aimants de Hughes, où l'on cherche à rendre l'aimant aussi sensible que possible aux variations d'intensité du courant, les bobines sont fixées aux pôles mêmes. Dans le champ inducteur d'une dynamo, au contraire, où l'action magnétisante de l'aimant a besoin d'être aussi fixe et aussi constante que possible, les bobines ne doivent pas être placées aux pôles.

ag.) — Les résistances propres à donner aux électro-aimants des dynamos ont été calculées par Sir William Thomson ², qui est arrivé aux résultats suivants :

Pour une machine « dynamo en série », il faut donner à la résistance des électro-aimants une valeur un peu inférieure à celle de l'armature.

L'ensemble de ces deux résistances doit être faible, comparativement à la résistance du circuit extérieur.

Pour une « dynamo en dérivation », la règle n'est plus la même.

1. Cette recommandation, que j'ai produite pour la première fois dans mes *Cantor Lectures*, a été relevée comme incorrecte par le C^{te} Du Moncel. M. Du Moncel soutenait qu'une répartition uniforme, soumise à la sanction de l'expérience, donnait l'effet magnétique le plus énergique. Il a pu en être ainsi dans des expériences faites sur des noyaux longs d'épaisseur uniforme ; mais il n'en est plus de même avec des noyaux plus gros au milieu qu'à leurs extrémités.

2. *Comptes rendus de l'Association britannique*, 1881, p. 528. — *L'Électricien*, t. II, p. 199.

Les meilleures proportions répondent aux conditions suivantes :

$$R = \sqrt{r_d r_a},$$

ou

$$r_d = \frac{R^2}{r_a},$$

expressions dans lesquelles les symboles R , r_d et r_a représentent respectivement les résistances du circuit extérieur, des bobines en dérivation et de l'armature. Nous donnons en ses lieu et place dans le Chapitre XIV, sur la théorie algébrique de la dynamo en dérivation, la démonstration de cette règle, déduite du coefficient économique. L'application de la règle pour les dynamos en dérivation montre que la résistance des bobines en dérivation doit être au moins 324 fois égale à celle de l'armature, sans quoi il est absolument impossible d'arriver à un rendement de 90 pour 100.

Échauffement des Electro-aimants.

Tous les électro-aimants sont sujets à s'échauffer : les noyaux par suite des courants parasites qui y sont induits, les bobines en raison de la résistance que présente au courant le cuivre le plus pur. La quantité de chaleur développée par seconde dans une bobine est égale au produit de sa résistance par le carré de l'intensité du courant. Il en résulte que, pour réduire la dépense, il faut éviter d'introduire dans la bobine aucune résistance inutile. Il est facile de démontrer que, pour une bobine *d'un volume donné*, la déperdition en chaleur est la même, à puissance égale d'aimantation, que la bobine soit formée d'un petit nombre de tours de gros fil, ou d'un grand nombre de tours de fil fin. La chaleur développée par seconde est $i^2 r$, et le pouvoir magnétisant iY ; i étant l'intensité du courant, r la résistance, et Y le nombre de tours de fil. Mais r varie comme le carré de Y , si le volume occupé par les spires est constant : supposons en effet que nous doublions le nombre des spires, et que nous réduisions de moitié la section transversale du fil; chaque mètre de fil fin aura une résistance double de ce qu'elle était précédemment, et il y aura deux fois

autant de mètres de fil; la résistance se trouvera donc quadruplée. La chaleur est alors proportionnelle à $r^2 Y^2$, et par suite au carré du pouvoir magnétisant. Par conséquent, si nous développons à l'aide de la bobine le même pouvoir magnétisant, la déperdition sous forme de chaleur sera la même, quelle que soit la garniture de la bobine. Pour obtenir la même intensité de champ magnétique dans une dynamo, il faut dépenser la même quantité d'énergie électrique, que les électro-aimants soient en série ou en dérivation sur l'armature, pourvu que leur volume ne change pas. Mais si l'on peut augmenter le *volume* de la bobine (et le poids du cuivre qui la constitue), on peut alors diminuer proportionnellement la déperdition sous forme de chaleur. Supposons, par exemple, qu'une bobine de dérivation de résistance r soit formée de Z tours de fil; si nous mettons sur une autre bobine également Z tours de fil réunis en série aux précédents, le pouvoir magnétisant restera sensiblement le même, bien que l'intensité du courant se trouve réduite de moitié, grâce à l'augmentation de la résistance qui a été doublée; mais la déperdition en chaleur diminuera de moitié, attendu que $2r \times \left(\frac{1}{2} i\right)^2$ est égal à $\frac{1}{2} r i^2$. En réalité, on doit employer une quantité de fil de cuivre telle que l'intérêt annuel du coût de premier établissement soit exactement égal à la dépense annuelle d'énergie électrique en échauffement inévitable. Cette loi (formulée par Sir W. Thomson) n'est pas absolument exacte, attendu que les spires extérieures n'ont pas une action magnétisante égale à celle des spires plus voisines du fer. Nous supposons également dans ce que nous venons de dire que nous doublons le nombre des spires quand nous diminuons de moitié la section du fil de cuivre; mais cela n'est pas absolument vrai parce que l'épaisseur du guipage isolant est, par rapport au diamètre du fil, plus forte pour des fils de faible diamètre que pour des fils de grande section. Dans la conception d'une machine dynamo, on doit d'ailleurs chercher la question d'économie et non pas se laisser guider par le fait accidentel d'un certain volume laissé pour l'enroulement. S'il n'y a pas assez d'espace autour des noyaux pour y loger la quantité de fil imposée par l'économie, il faudra calculer de nouveaux noyaux assez longs pour recevoir le fil le plus convenable au point de vue économique.

Inducteurs dans la pratique.

Dans la classification des machines dynamos que nous avons donnée au Chapitre II, nous avons vu que celles de la première classe exigeaient un champ de force unique et à peu près uniforme, tandis qu'il fallait à celles de la seconde classe un champ complexe de force différant de signe et d'intensité en divers points. Ces deux genres de champs magnétiques nous conduisent à une démarcation générale correspondante entre les deux classes de machines. Dans les premières, nous avons généralement deux pièces polaires sur les côtés opposés d'une armature rotative; dans les secondes, une double série de pôles alternés autour d'une circonférence ou d'une couronne, les bobines induites étant montées sur une carcasse mobile entre ces deux séries de pôles.

Si nous prenons tout d'abord la première classe de machines, nous trouvons pratiquement de grandes différences dans la forme et la construction de leurs électro-aimants. Parmi les types existants, il en est bien peu dans lesquels on se soit préoccupé d'assurer la fixité du champ magnétique en donnant aux électro-aimants la longueur, le poids et la solidité voulus, ou en les munissant de pièces polaires suffisamment lourdes. Dans les essais de dynamos que j'ai eu à faire, il m'est souvent arrivé d'avoir à signaler que les électro-aimants étaient recouverts d'un poids de fil inutile; et il m'a été ordinairement répondu qu'avec moins de fil la machine ne fonctionnerait pas aussi bien. Cependant, si l'on trouve nécessaire de loger sur les électro-aimants des spires de fil assez nombreuses pour les amener pratiquement à saturation bien longtemps avant que la machine ne développe son travail maximum, il est clair que, de deux choses l'une, ou la quantité de fer est insuffisante, ou sa qualité laisse à désirer. Dans les machines Bürgin, où les noyaux des électro-aimants sont en fonte, la faible capacité magnétique du métal est compensée par le poids considérable qu'on leur donne; mais les électro-aimants à noyau de fonte n'arrivent guère à une puissance supérieure à 60 p. 100 de celle qu'on obtient à dimensions égales avec le fer forgé. Dans les petites machines

Siemens, la quantité de fer employée dans les électro-aimants serait absolument insuffisante si le métal n'était pas d'une qualité tout à fait supérieure. Quoi qu'il en soit, la masse de fer (surtout dans le voisinage des pôles) pourrait, suivant moi, être avantageusement augmentée. Les premières machines de Wilde et les dynamos bien connues d'Edison présentent de longs électro-aimants garnis de pièces polaires pesantes. Les machines dynamos d'Edison sont toutes à signaler à ce point de vue; leurs pièces polaires et les culasses qui relient les noyaux des électro-aimants sont démesurément pesantes. Ce fait n'est pas particulier aux gigantesques dynamos employées à l'éclairage d'Holborn-Viaduct, à Londres (voir fig. 102, p. 149); on le rencontre également dans les machines plus petites servant aux installations privées de 15 ou de 60 lampes. Les dynamos Edison-Hopkinson sont encore plus lourdes, mais de dimensions plus ramassées (voir fig. 105, p. 153).

Le principe de la conformation extérieure des électro-aimants à peu près suivant les courbes magnétiques des lignes de force est appliqué, jusqu'à un certain point, dans des types de machines très différents, tels que celle de Gramme à aimants « Jamin », la machine de Jürgensen et la dynamo « mouse-mill » de Sir W. Thomson (fig. 112, p. 160). Ces deux dernières machines présentent plusieurs contrastes curieux. Dans celle de Jürgensen, les électro-aimants ont des pièces polaires pesantes; dans celle de Thomson, il n'y en a pas; et, dans la machine de Thomson, le noyau de fer est plus épais au milieu qu'aux extrémités. Elles comportent toutes deux des électro-aimants auxiliaires, fixés à l'intérieur des armatures mobiles, et destinés à concentrer et à augmenter l'intensité du champ magnétique, suivant l'idée brevetée par Lord Elphinstone et M. Vincent (voir p. 157). Dans la machine Thomson, les bobines sont plus grosses au milieu des électro-aimants; dans celle de Jürgensen, elles sont renforcées autour des pôles. La théorie nous a fait précédemment condamner cette dernière disposition. A en juger par un rapport de MM. les professeurs Ayrton et Perry¹ sur cette machine, cette disposition n'est nullement satisfaisante dans la pratique; il y a plus de spires qu'il n'en faut pour saturer

1. *Electrical Review*, 23 septembre 1882.

les électro-aimants. Il est possible que le défaut réside non pas dans un excès de spires, mais bien dans la mauvaise position qui leur est attribuée.

Des considérations théoriques nous ont conduit à préconiser la division des pièces polaires en lames minces, de manière à prévenir la perte d'énergie résultant de la production des courants de Foucault qui peuvent s'y développer. Je ne vois que deux machines dans lesquelles cette précaution ait été prise : l'une est la machine dynamo à disque des D^{rs} Hopkinson et Muirhead, dont les électro-aimants sont constitués par des lames de fer réunies en un faisceau solide ; l'autre est la machine Weston.

Commutateurs, Collecteurs et Balais.

ah.) — Les commutateurs et collecteurs étant susceptibles de s'échauffer par suite de contact imparfait avec les balais et d'être brûlés par les étincelles, on doit les constituer de pièces de cuivre très massives, ou même de bronze, ou encore mieux de bronze phosphoreux. Certains constructeurs fondent le métal en un cylindre creux dans lequel ils découpent ensuite des bandes parallèles. Plus souvent le métal est fondu ou étiré en baguettes de la forme des lames qui sont ensuite fraisées à la demande et ajustées sur place. Les collecteurs, analogues dans leur constitution essentielle au type que nous avons décrit, sont communs à toutes les machines de la première catégorie, à l'exception de la machine Brush seule qui possède un commutateur multiple au lieu d'un collecteur. Le collecteur de la première machine de Pacinotti ne diffère du type actuel qu'en ce que ses lames isolées étaient alternativement légèrement déplacées le long des génératrices du cylindre, mais de manière à permettre encore au même balai de glisser d'une barre à l'autre. La variante de Niaudet, dans laquelle les barres sont radialement fixées à un disque, n'est qu'une simple modification de détail, dont le résultat ne justifie pas l'adoption. Dans le collecteur appliqué à la machine Weston et à quelques variétés de la machine Schuckert, les lames sont obliques ou incurvées, sans autre effet, cependant, que de prolonger l'instant pendant lequel

le balai, en passant du contact avec une lame au contact avec la suivante, met en court circuit l'une des sections de la bobine.

ai.) — Dans le cas où le collecteur est formé de lames de cuivre disposées parallèlement sur la périphérie d'un cylindre, les lames doivent pouvoir se démonter séparément pour permettre l'examen et la réparation.

aj.) — Les balais doivent toucher le commutateur ou le collecteur aux deux points de la circonférence qui correspondent respectivement aux potentiels le plus élevé et le plus bas. Dans une machine dynamo bien étudiée et construite symétriquement, ces points se trouvent situés aux deux extrémités d'un même diamètre.

ak.) — L'armature, quand elle est parcourue par des courants, agissant elle-même comme un aimant, il en résulte que les lignes de force magnétiques ne suivent pas une ligne droite de pôle à pôle des électro-aimants, mais qu'elles prennent dans leur ensemble une position angulaire et se trouvent déviées d'un nombre considérable de degrés dans le sens de la rotation. Nous nous occuperons plus spécialement ici de cette réaction du courant induit. Par suite de cette réaction et de certaines autres, le diamètre de commutation (qui dans les machines des types Siemens et Gramme est perpendiculaire, et dans les machines du type Lontin parallèle aux lignes de force résultantes) doit être avancé dans le sens du mouvement. En d'autres termes, les balais doivent être *calés suivant un certain angle*. Cet angle de calage dépend de la relation qui existe entre l'intensité du champ magnétique et l'intensité du courant dans l'armature. Ce rapport varie suivant les quatre modes d'excitation du champ magnétique. Pour les machines dynamos en série, dans lesquelles ces deux intensités dépendent directement l'une de l'autre, l'angle de calage est à peu près constant, quelle que soit la résistance extérieure. Dans d'autres catégories de dynamos il n'en est pas de même, parce que les variations de résistance dans le circuit extérieur ne produisent pas une variation proportionnelle entre les deux variables qui déterminent l'angle de calage.

al.) — Il résulte de là qu'il convient d'adapter à toutes les dynamos une disposition (calage variable) permettant de faire tourner les balais autour du commutateur ou du collecteur, de

manière à les mettre en contact avec le diamètre de commutation correspondant à la charge de la machine; autrement on aura des étincelles aux balais, et, dans une partie au moins des sections, le courant se consumera à vaincre une force contre-électromotrice.

am.) — Les dispositions du commutateur ou collecteur doivent être telles que les balais passent d'une lame à l'autre sans mettre en court circuit aucune spire ou section siège de force électromotrice, sous peine de perte d'énergie en échauffement de cette spire. Aussi est-il bon de disposer les pièces polaires de telle sorte que les diverses sections de bobines de chaque côté de la position neutre soient à des potentiels très peu différents l'un de l'autre.

an.) — Les points de contact entre les balais et le collecteur doivent être aussi nombreux que possible; cette multiplication des points de contact a pour effet de diminuer la dépense d'énergie sous forme d'étincelles dans le rapport inverse du carré de ce nombre. A cet effet, les balais se font soit en fils étirés, soit en minces lames de cuivre disposées parallèlement, et portant tous, par une de leurs extrémités, sur le collecteur.

ao.) — Les segments du collecteur ou commutateur doivent être soigneusement isolés l'un de l'autre et de l'arbre. Un grand nombre de constructeurs les isolent à l'aide de couches de fibre vulcanisée, de carton d'amiante ou de mica. D'autres réservent entre eux des espaces libres où l'air sert d'isolateur. Si l'on n'y prend garde l'isolement peut-être compromis par de la poussière de cuivre détachée des balais ou par une légère couche d'huile carbonisée. Ce dernier accident se produit souvent avec le carton d'amiante; il est d'autant plus à redouter qu'il s'accompagne fréquemment d'une décroissance, dont on ne se rend pas compte, dans la puissance de la machine, décroissance due à la formation d'un court circuit invisible à travers une masse carbonisée au-dessous de la surface. Il n'y a d'autre remède que d'enlever la matière isolante et de la remplacer. Aussi l'expérience a-t-elle conduit certains ingénieurs à préférer à l'huile le blanc de Meudon pour l'entretien des collecteurs. Dans la dynamo Hockhausen, les lames du collecteur ont la forme d'une L; elles sont solidement fixées sur une embase d'ardoise et laissent l'air circuler entre elles. D'autres constructeurs établissent une sorte de ventilation entre

les lames séparées du collecteur pour empêcher la poussière de s'y loger et pour les refroidir en même temps. Nous devons ajouter que plusieurs constructeurs entourent le collecteur d'une frette en acier pour maintenir les lames.

Balais.

Le genre de balais le plus employé pour récolter les courants du collecteur est constitué par un faisceau de fils de cuivre dressés, juxtaposés, soudés ensemble à l'une de leurs extrémités et maintenus par une gaine spéciale. Le grand nombre de points de contact ainsi assuré présente l'avantage de diminuer les étincelles. On réunit souvent ainsi en un seul balai deux couches de fil, comme l'indique la figure 35.

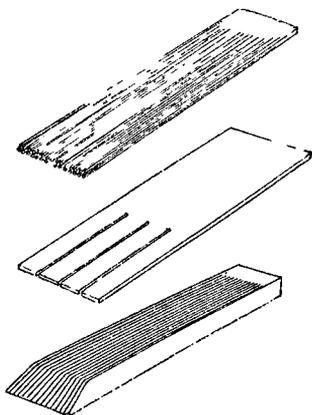


FIG. 35, 36, 37.
Différents genres de Balais.

On forme aussi les balais de larges bandes de cuivre écaillé sciées longitudinalement sur une certaine longueur, de manière à multiplier les points de contact (figure 36). Ces balais sont employés dans les machines Siemens et Brush.

Edison a employé comme balais une série de lames de cuivre portant de champ sur le collecteur, et soudées sur plat l'une à l'autre par leur extrémité la plus éloignée du collecteur (fig. 37). Ici encore, l'objectif est la subdivision des étincelles au contact.

M. Gramme a essayé l'emploi de balais rotatifs en forme de disques métalliques; Sir W. Thomson et M. C.-F. Varley en ont également imaginé d'analogues.

CHAPITRE IV

INDUCTION DES COURANTS DANS LES ARMATURES ET DISTRIBUTION DES POTENTIELS AUTOUR DU COLLECTEUR

En étudiant la dynamo dans sa forme la plus simple et en quelque sorte idéale, nous avons vu que l'induction dans la boucle ou spire en mouvement était nulle pour la position correspondant au diamètre de commutation et qu'elle allait en augmentant (comme le *sinus* de l'angle) jusqu'au moment où elle atteint son maximum,

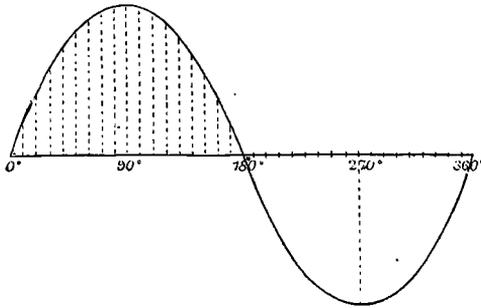


FIG. 38. — Courbe d'Induction.

à 90 degrés (voir fig. 14, p. 21). En d'autres termes, les bobines élémentaires deviennent de plus en plus actives à mesure qu'elles se rapprochent des pièces polaires, et de moins en moins actives à mesure qu'elles s'en éloignent, le tout suivant une loi régulière d'ondulation. La figure 38, qui n'est autre qu'une courbe de *sinus*, peut servir à représenter, par la hauteur de ses ordonnées, les variations de l'induction produite dans une armature de dix en dix degrés de son mouvement circulaire. S'il y a, par exemple, trente-six sections dans une armature en anneau, de telle sorte que

les sections se trouvent à 10 degrés d'intervalle l'une de l'autre, les sections les moins actives seront celles situées à 0 degré et à 180 degrés, tandis que les plus actives sont celles qui correspondent à 90 et 270 degrés. Mais dans toutes les armatures « cylindriques » ou « en anneau », les diverses sections sont reliées entre elles de telle sorte que toute force électromotrice induite dans la première section s'ajoute à celle induite dans la seconde, que celle induite dans la troisième s'ajoute aux deux premières, et ainsi de suite sur tout le pourtour jusqu'au balai situé du côté opposé par rapport au point de départ. Leurs forces électromotrices individuelles viennent ainsi s'ajouter les unes aux autres exactement comme les forces électro-

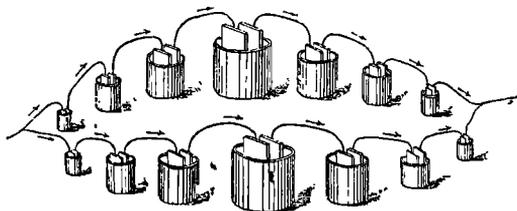


FIG. 39. — Couronne d'éléments de pile.

motrices individuelles des éléments d'une pile montée en série. Une couronne d'éléments de pile montés en série, et dont une moitié tend à émettre son courant en sens inverse de l'autre dans les deux parties symétriques de la couronne ainsi formée (fig. 39), représente assez bien l'induction successive dans les sections d'une armature en anneau. S'il était possible d'indiquer que les sections situées à 90 degrés des balais ont un effet inducteur beaucoup plus puissant que celles qui occupent les positions voisines des balais, la comparaison serait encore plus frappante. Les éléments médians de chaque demi-couronne sont représentés plus grands pour en donner une idée ; mais malheureusement des éléments *de grande dimension* ne possèdent pas une force électromotrice supérieure à celle d'éléments plus petits, bien qu'ils aient une résistance intérieure moindre.

Sachant maintenant comment l'induction dans les bobines élémentaires ou sections individuelles va en s'élevant et s'abaissant sur le pourtour de l'anneau, cherchons à quoi nous arriverons en sommant ces forces électromotrices séparées de manière à trouver

leur effet total. Nous aurons à ajouter les effets de toutes les sections successives, depuis le balai négatif à 0 degré d'un côté, jusqu'au balai positif à 180 degrés de l'autre côté : et le résultat sera le même pour chaque moitié de l'anneau, en raison de la symétrie de ses deux parties. Supposons que nous prenions le côté partant de 0 degré pour aller à 180 degrés en passant par 90 degrés (à gauche des fig. 14 et 16). Si nous examinons la courbe précédemment donnée (fig. 38), nous verrons que du moment où les hauteurs des lignes ponctuées représentent l'action inductrice, il suffira, pour obtenir l'effet total, d'ajouter les unes aux autres les longueurs de toutes ces lignes de 0 à

180 degrés; et naturellement leur somme sera égale à celle des longueurs négatives comprises entre 180 et 360 degrés. Mais nous pouvons procéder d'une autre façon qui, tout en nous fournissant le total final, nous montrera en même temps comment la somme en question va en croissant à chaque addition successive d'une longueur. Nous trouverons que la somme croît d'abord lentement, puis rapidement, puis enfin lentement encore en approchant de sa plus haute

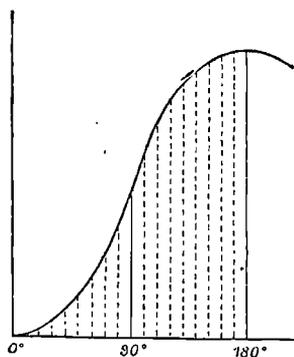


FIG. 40. — Courbe intégrée des Potentiels.

valeur. La somme de ces effets croîtrait en résumé d'une façon analogue aux indications en réduction fournies par la courbe de la figure 40. Ce mode d'opérer, qui consiste à ajouter les unes aux autres une série de valeurs variant d'une façon continue, est ce que les mathématiciens désignent sous le nom d'*intégration*. La courbe de la figure 40 s'obtient en intégrant les valeurs de la courbe de la figure 38 entre les limites de 0 et de 180 degrés. Dans la dynamo réelle cette intégration s'effectue par la nature même des choses; c'est une conséquence de ce fait que chaque section est réunie à celles qui la précèdent et qui la suivent.

Il est possible d'étudier directement par l'expérience ces deux effets : l'induction dans les bobines individuelles, et le potentiel total ou intégré.

La force électromotrice induite dans une section individuelle, au moment où elle arrive à une position déterminée, peut être étudiée de la manière suivante à l'aide d'un voltmètre ou galvanomètre de potentiel. Deux petites brosses métalliques sont fixées à un morceau de bois de manière à laisser entre elles un espace libre égal à la distance qui sépare deux lames consécutives du collecteur. Ces brosses sont reliées par des fils aux bornes du voltmètre, de telle sorte que toute différence de potentiel entre elles est indiquée sur le cadran de l'instrument. Les deux brosses sont appliquées contre le collecteur pendant qu'il tourne, comme l'indique la figure 41 ; et, comme elles peuvent être appliquées en un point quelconqué,

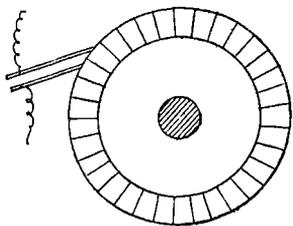


FIG. 41. — Mode d'exploration au Collecteur d'une dynamo.

elles donneront sur le voltmètre une indication mesurant la valeur de la force électromotrice dans telle section de l'armature qui passe dans le champ magnétique par la position particulière correspondant à la situation des contacts. Cette méthode d'exploration a été imaginée par l'auteur et par le D^r Isenbeck indépendamment l'un de l'autre. Dans le cas de la petite dynamo Siemens qu'il

étudiait, l'auteur a trouvé que la différence de potentiel indiquée était presque *nulle* pour les sections voisines des vrais balais de la machine, et présentait son maximum vers la moitié de la distance qui les séparait. En réalité, la différence de potentiel s'élevait d'une façon très accentuée à 90 degrés des vrais balais, c'est-à-dire précisément dans la région où, comme on le voit dans la figure 38, l'induction est théoriquement à son point le plus haut, et où, comme l'indique la figure 40, l'inclinaison de la courbe de potentiel total est la plus forte.

Après cette première expérience, l'auteur a employé ensuite un autre procédé d'expérimentation sur sa machine Siemens. Il a démonté cette machine et excité séparément ses électro-aimants. Deux lames consécutives du collecteur ont été alors reliées à un galvanomètre à miroir muni d'une aiguille relativement pesante et à oscillations lentes. Une petite manivelle adaptée au collecteur permettait de tourner l'induit à la main en lui faisant parcourir

successivement des angles de 10 degrés, le collecteur étant divisé en trente-six sections. Les déviations ainsi obtenues mesuraient naturellement l'action inductrice pour chaque position. Les résultats fournis par ce nouveau mode d'opérer ont pleinement confirmé ceux donnés par la méthode précédente.

L'accroissement du potentiel totalisé (c'est-à-dire « intégré ») autour de l'armature peut se mesurer expérimentalement à l'aide d'une méthode due à M. Mordey, et qui implique aussi l'emploi d'un voltmètre.

Dans une dynamo bien conçue de la première classe, si l'on mesure la différence de potentiel entre le balai négatif et les lames successives du collecteur, on trouve que le potentiel va régulièrement en augmentant tout autour du cylindre collecteur, dans les deux directions, pour atteindre un maximum du côté opposé où se trouve le balai positif.

M. W.-M. Mordey, qui le premier avait appelé l'attention de l'auteur sur le fait de cette distribution irrégulière dans des machines mal étudiées, a imaginé le moyen suivant pour l'ob-

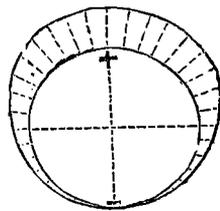


FIG. 42. — Diagramme du Potentiel autour du Collecteur d'une machine dynamo.

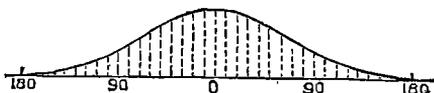


FIG. 43. — Diagramme horizontal des Potentiels autour du Collecteur d'une machine dynamo.

server. L'une des bornes d'un voltmètre est reliée à l'un des balais de la machine, tandis que l'autre est fixée par un fil à un petit balai ou ressort métallique qui peut presser contre le collecteur en mouvement en un point quelconque de sa périphérie. L'auteur avait fait valoir l'avantage qu'il y aurait à grouper ces indications autour d'un cercle correspondant à la circonférence du collecteur. Les figures 42 et 43 montrent ainsi comment, dans une bonne machine Siemens ou Gramme, le potentiel s'élève graduellement depuis son minimum jusqu'à son maximum.

On voit que, si l'on prend le balai négatif comme point infé-

rieur du cercle, le potentiel s'élève d'une façon parfaitement régulière jusqu'à un maximum au balai positif. Les valeurs portées radialement autour du cercle dans la figure 42 sont représentées en ordonnées verticales par rapport à une droite dans la figure 43 qui n'est autre que la figure 40 complétée pour les deux moitiés du collecteur. La figure 40 cependant n'est qu'un diagramme théorique de ce que doit être la distribution des potentiels, tandis que la figure 43 est la représentation d'observations relevées directement sur une machine Gramme « A ». Si le champ magnétique dans lequel se meut l'armature était uniforme, cette courbe serait une véritable *sinusoïde*, et la plus ou moins grande inclinaison de la courbe en différents points permettrait de juger de l'activité ou de l'inactivité relative des bobines élémentaires dans les diverses parties du champ. La hausse de potentiel n'est pas constante pour chaque paire de lames, autrement la courbe serait simplement formée de deux droites obliques également inclinées à droite et à gauche du point milieu. Au contraire, il existe une très faible différence de potentiel entre les lames du collecteur respectivement situées à droite et à gauche du balai positif. La plus grande différence de potentiel se présente aux points où la courbe se redresse le plus rapidement dans une position voisine de 90 degrés par rapport aux balais, c'est-à-dire par le fait vers la partie de la circonférence du collecteur en connexion avec les bobines élémentaires qui traversent la position d'action maxima. Si le champ magnétique est parfaitement uniforme, le nombre de lignes de force traversant une spire doit être proportionnel au sinus de l'angle que fait le plan de cette spire avec la direction de la résultante des lignes de force dans le champ, et la proportion dans laquelle sont coupées ces lignes de force doit être proportionnelle au cosinus de cet angle. Or le cosinus est maximum quand cet angle = 0 degré; par suite, quand la spire est parallèle aux lignes de force, c'est-à-dire à 90 degrés par rapport aux balais, le potentiel doit prendre son maximum d'élévation : c'est ce que réalise très approximativement le diagramme de la figure 43, qui est, à très peu de chose près, une véritable *sinusoïde*.

Les courbes ainsi relevées d'après les mesures de la distribution du potentiel au collecteur ne fournissent pas seulement une indi-

cation du point où doivent être placés les balais pour donner le meilleur résultat; elles permettent encore de juger de l'*activité* ou de l'*inactivité* des spires dans les différentes parties du champ magnétique et de déterminer l'intensité réelle de ces dernières pendant la marche de la machine. Si les balais sont mal placés ou si les pièces polaires ne sont pas convenablement conformées, le potentiel croitra irrégulièrement et présentera des maxima et des minima en d'autres points. La figure 44 donne un diagramme réel relevé sur une machine dynamo qui présentait des défauts de ce genre, et la figure 45 en est le développement sur une ligne horizontale; on y constate non seulement que l'accroissement du potentiel était irrégulier, mais encore qu'une partie du collecteur était plus positive que le balai positif, tandis qu'une autre était moins négative que le balai négatif. Par suite, la différence de potentiel entre les balais n'était pas normale, et, dans une partie des bobines élémentaires, les courants se trouvaient réellement en opposition avec une force électromotrice contraire.

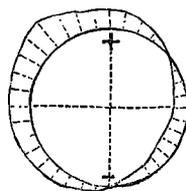


FIG. 44.

Diagramme du Potentiel autour du Collecteur d'une Machine défectueuse.

Ce mode de représentation de la distribution du potentiel à la

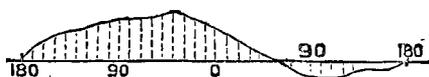


FIG. 45. — Diagramme horizontal des Potentiels au Collecteur d'une Machine défectueuse.

périphérie du collecteur a rendu de véritables services dans la pratique, et fourni l'explication de divers phénomènes anormaux qui avaient souvent embarrassé les observateurs impuissants à s'en rendre compte. Dans une machine dynamo mal conçue, à laquelle correspondrait un diagramme analogue à celui de la figure 44, une seconde paire de balais en contact avec les points qui présentent les potentiels maximum et minimum ne saurait fournir un bon courant, indépendant du courant nuisible recueilli par les premiers balais. On trouve cependant cette distribution défectueuse, présentant des maxima et des minima anormaux, dans un brevet pris par un

inventeur qui place des balais en six points différents du collecteur!

On peut obtenir des courbes analogues à celles ci-dessus avec les collecteurs de toutes les dynamos de la première catégorie : Gramme, Siemens, Edison, etc., à l'exception de la machine Brush, qui, n'ayant pas de collecteur semblable, fournit des diagrammes d'un genre absolument différent. Il n'est naturellement pas indispensable, pour prendre ces diagrammes, que les balais réels de la machine soient au contact ou qu'ils soient reliés par un circuit quelconque; mais, dans ce cas, les électro-aimants doivent être excités séparément. Il ne faut pas oublier non plus que la présence de balais prenant le courant en un point quelconque du collecteur modifie la distribution du potentiel autour de ce collecteur; la nature et l'importance de cette modification dépendent de la position des balais et de la résistance du circuit qui les relie.

Nous pouvons consigner ici un résultat immédiat des observations de M. Mordey sur la distribution du potentiel et du mode de représentation conseillé par l'auteur. Celui-ci avait suggéré à M. Mordey l'idée que, dans une dynamo où cette distribution était défectueuse et où les courbes de potentiel total présentaient des anomalies, la faute provenait d'irrégularités dans l'induction en différents points du champ magnétique, et qu'il fallait dès lors en chercher le remède dans un changement de distribution des lignes de force du champ par une modification de forme des pièces polaires. Quinze mois après, l'auteur a été heureux d'avoir à féliciter M. Mordey du succès complet avec lequel il avait tiré parti de son avis. Il avait absolument remédié à la production d'étincelles qui était le vice de la machine Schuckert. Le diagramme présenté comme type défectueux dans la figure 44 avait été relevé d'après une machine Schuckert avant les modifications qui y ont été depuis apportées par ses soins avec un succès aussi marqué et qui sont détaillées plus loin, pages 126 et 129.

Nous avons donné ici un certain développement à ces méthodes, en raison de leur grande utilité à l'égard des dynamos qui présentent des défauts de ce genre. Elles sont également très intimement liées aux recherches du D^r Isenbeck dont nous allons maintenant nous occuper.

Le docteur Isenbeck a décrit, dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* d'août 1883, un petit appareil très remarquable destiné à la détermination de l'induction dans les bobines élémentaires d'un anneau Gramme, et à la recherche de l'influence exercée par des pièces polaires de différentes formes sur ces actions.

L'appareil du docteur Isenbeck (fig. 46) se compose d'un bâti en bois, de forme circulaire, placé entre les deux pôles de deux petits barreaux aimantés en acier de 25 centimètres de long, disposés dans le prolongement l'un de l'autre, leurs pôles opposés en regard et à 25 centimètres de distance. Sur le bâti, mobile autour de son centre, est fixé un anneau de bois ou de fer sur lequel peut se mouvoir une petite bobine de fil fin. Cette bobine correspond à l'une des sections élémentaires de l'anneau de Pacinotti ou Gramme, dont le cercle de bois ou de fer constitue l'âme. La bobine en question peut être fixée dans une position quelconque sur l'anneau, les extrémités du fil qui la recouvre communiquant avec un galvanomètre. Un déplacement de la bobine, isochrone avec une oscillation de l'aiguille du galvanomètre, détermine un mouvement de cette dernière sous l'influence des courants induits, et la déviation qui en résulte donne une mesure relative de l'induction qui prend naissance dans la portion spéciale du champ où est située la bobine. Les oscillations ou vibrations du bâti sont limitées par deux petits arrêts qui ne leur permettent pas de dépasser un angle de 7° 5'. Des pièces polaires en fer doux, recourbées en arcs de 160 degrés environ, de manière à embrasser l'anneau des deux côtés sans se toucher, peuvent s'adapter sur les pôles des aimants. Dans certaines expériences on disposait à l'intérieur de l'anneau un disque de fer, et, dans d'autres, un aimant dont les pôles renforçaient ou affaiblissaient à volonté, suivant les cas, l'action des pôles extérieurs. Le docteur Isenbeck est arrivé à l'aide de cet appareil à des résultats des plus intéressants. Avec un anneau de bois et des aimants dépourvus d'expansions polaires, il a observé une inversion très remarquable de l'action inductive à 25 degrés environ de la position la plus voisine des pôles.

La figure 46 donne un schéma des parties essentielles de l'instrument en question et représente la petite bobine montée sur l'anneau de bois et susceptible de recevoir le mouvement vibratile

à droite et à gauche, limité par les deux arrêts. Quand on fait osciller le système à 0 degré, c'est-à-dire dans la position diamétrale perpendiculaire à la ligne des pôles, il ne se produit pas d'induction dans la bobine ; mais si l'on déplace celle-ci successivement le long de l'anneau en allant vers les pôles, et si l'on fait osciller le système pour chacune de ces positions consécutives, on voit l'induction augmenter tout d'abord, puis cesser et reprendre ensuite d'une façon très accentuée en approchant du pôle où la proportion dans laquelle la bobine coupe les lignes de force passe par un maximum.

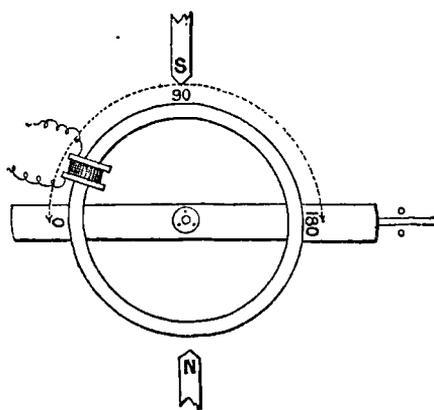


FIG. 46. — Appareil d'Isenbeck.

Cette induction puissante dans le voisinage des pôles est néanmoins limitée à une étroite région qui ne dépasse pas 12 degrés de chaque côté du pôle. Au delà de ces points on constate les fausses inductions donnant naissance dans la bobine, au moment où elle traverse les régions extérieures à ces 12 degrés, à des forces électromotrices inverses de celles produites dans les régions voisines des pôles.

Le docteur Isenbeck a constaté un accroissement de ces inductions inverses quand un disque de fer ou un aimant à pôles opposés est inséré à l'intérieur de l'anneau ; un aimant renforçant la polarité de l'aimant extérieur améliore au contraire l'induction efficace. Ces actions inverses se manifestant dans toutes les spires élémentaires d'un anneau Gramme, à l'exception de celles comprises dans les 12 degrés à droite ou à gauche de la ligne diamétrale

des pôles, seraient naturellement absolument nuisibles au bon fonctionnement de la machine, et la distribution du potentiel autour du collecteur ne serait rien moins que régulière. La figure 47 représente, d'après le docteur Isenbeck, la courbe d'induction pour les quatre quadrants consécutifs. De 0 à 90 degrés la bobine d'exploration est supposée osciller dans des positions successives en allant du

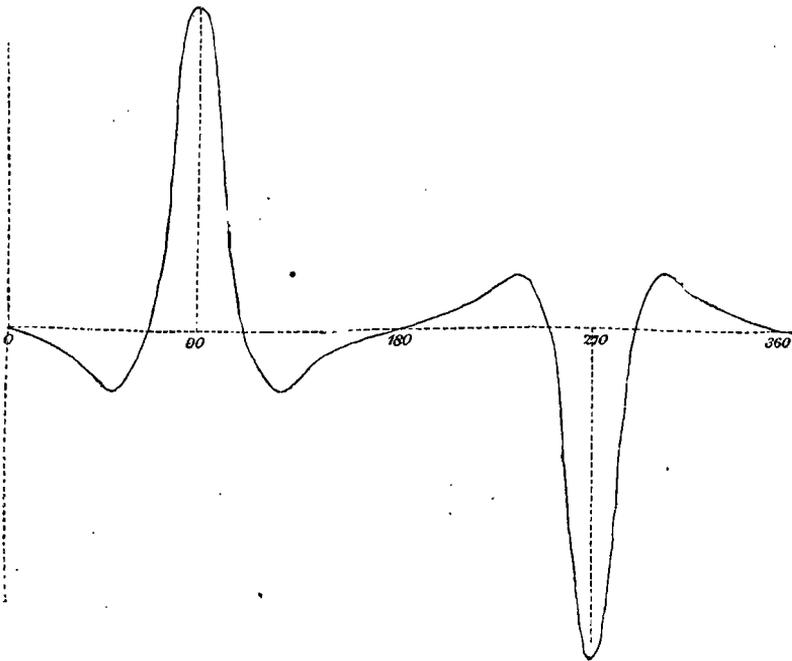


FIG. 47.

point où, dans la dynamo réelle, serait le balai négatif jusqu'à un point opposé au pôle S. de l'électro-aimant inducteur. De 90 à 180 degrés elle passe, dans son mouvement circulaire, au balai positif; de 180 à 270 degrés à un point opposé au pôle N. et de 270 à 360 degrés elle est censée retourner au balai négatif. Or, la hauteur de cette courbe en un point quelconque donnant, pour une section type, la mesure de l'induction produite en elle pendant son mouvement dans la portion correspondante du champ magnétique, et toutes les sections, dans l'anneau réel de Pacinotti ou de Gramme, étant reliées l'une à l'autre sur tout le pourtour de l'an-

neau, il en résulte que le potentiel réel en un point quelconque dans la série des sections s'obtiendra par la sommation de la force électromotrice totale induite jusqu'à ce point. En d'autres termes, il faut intégrer la courbe pour obtenir la courbe corrélative de potentiels correspondant à l'état de choses réel autour du collecteur de la machine. La figure 48 donne la courbe ainsi intégrée d'après la figure 47 à l'aide de l'ingénieux intégrateur de M. C. Vernon Boys. La hauteur de l'ordonnée en un point quelconque de cette seconde courbe est proportionnelle à la surface totale limitée par la première courbe jusqu'au point correspondant. Ainsi la hauteur à 90 degrés dans la seconde courbe est proportionnelle à la surface totale comprise dans la première courbe jusqu'au point marqué

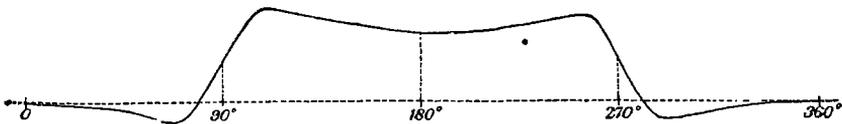


FIG. 48.

90 degrés. Bien que l'induction (première courbe, fig. 47) aille en s'abaissant à partir de 90 degrés et tombe à zéro vers 102 degrés, la somme des potentiels (seconde courbe, fig. 48) continue à croître, comme on le voit, jusqu'à 102 degrés où elle passe par un maximum; elle s'infléchit ensuite, en raison de la fausse induction de sens contraire qui se manifeste à partir de ce point, jusqu'à 180 degrés, comme l'indique la première courbe. Si une dynamo quelconque présentait réellement cette courbe de potentiel, on peut être sûr qu'on obtiendrait une force électromotrice supérieure en ramenant le balai de 180 à 102 ou 258 degrés où le potentiel est plus élevé. Une dynamo pour laquelle la courbe des potentiels au commutateur offrirait des irrégularités analogues à celles de la figure 48 serait une machine à très mauvais rendement et donnerait probablement beaucoup d'étincelles au collecteur. Il est évident que l'induction dans une portion des sections élémentaires est de sens contraire à celle produite dans quelques-unes des sections adjacentes.

Ici se posent naturellement deux questions : — Pourquoi se

produit-il ainsi dans l'anneau des inductions nuisibles ; et comment peut-on les éviter ?

Les recherches du docteur Isenbeck fournissent la réponse sur ces deux points. Le docteur Isenbeck a calculé d'après les lois du potentiel magnétique le nombre des lignes de force coupées aux différents points du trajet de l'anneau. Il a trouvé que l'expression mathématique compliquée correspondant à ce cas fournit, quand on la discute, des valeurs négatives pour des angles compris entre 12 et 90 degrés. Les courbes des valeurs qui satisfont à ses équations

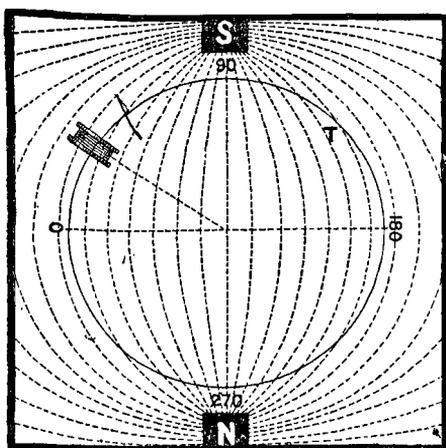


FIG. 49.

présentent des *minima* exactement dans les mêmes régions que celles révélées par ses expériences. Ce résultat est aussi satisfaisant que possible. Mais on peut arriver aux mêmes conclusions d'une manière beaucoup plus simple en considérant la forme et la distribution des lignes de force magnétiques dans le champ inducteur. La figure 49 représente à la fois ces lignes de force et la bobine d'exploration dans la même position que dans la figure 46. La simple inspection montre qu'à 0 degré un certain nombre de lignes de force pénètre la bobine d'exploration. A mesure que la bobine dans son mouvement circulaire se meut vers le pôle S., le nombre de ces lignes de force commence par augmenter, puis il devient un instant stationnaire sans croître ni décroître ; après quoi on constate une rapide décroissance qui, au moment où la bobine passe au point 90 degrés,

se traduit par une absence complète de lignes de force à travers cette bobine. Mais au même instant les lignes de force recommencent à se presser de l'autre côté de la bobine et leur nombre, bien qu'elles aient une direction négative, augmente jusqu'à ce que la bobine soit arrivée à peu près à la position marquée T, où les lignes de force sont approximativement tangentes à sa direction; ici alors il y a inversion parce que, à partir de ce point en allant jusqu'à 180 degrés, le nombre des lignes de force coupées par la bobine va en diminuant. On voit ainsi que ces inversions d'induction doivent nécessairement se produire pour une petite bobine tournant dans un champ magnétique où les lignes de force sont distribuées sui-

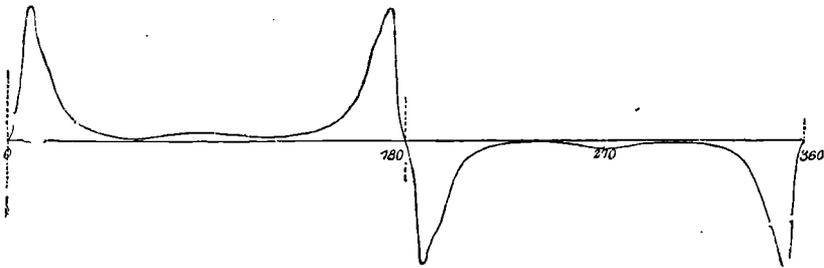


FIG. 50.

vant des courbes et avec l'inégale densité d'un champ magnétique ainsi constitué. Le remède est tout indiqué; il suffit de réaliser un champ magnétique plus uniforme, offrant des lignes de force plus également distribuées et plus tendues.

Si à l'âme de bois on substitue un noyau de fer, l'induction utile est plus considérable et la fausse induction est moindre; il y a bien encore une inversion, mais elle se produit à 25 degrés environ du pôle et est tout à fait insignifiante. L'introduction de pièces polaires en fer s'étendant en deux arcs à peu près semi-circulaires de part et d'autre de chacun des aimants a pour effet, dans le cas du maintien du noyau en bois, de modifier complètement l'induction, de sorte que la courbe, au lieu de présenter un maximum à 90 degrés de son point de départ, en présente un vers 10 degrés et un autre vers 170 degrés. C'est ce qu'indique la figure 50.

La courbe intégrée de potentiel donnée par la figure 51 est intéressante: elle ne présente pas de renversements; mais les poten-

tiels s'élèvent et tombent si rapidement de chaque côté des points 0 et 180 degrés, que le plus petit déplacement des balais pourrait produire des inversions désastreuses.

Mais si l'on fait simultanément la double modification en em-

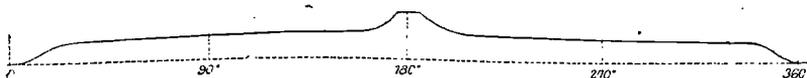


FIG. 51.

ployant à la fois les pièces polaires en fer et le noyau annulaire en fer, l'effet change immédiatement. Il n'y a plus d'inversion, bien que l'induction présente encore certaines particularités. La figure 52

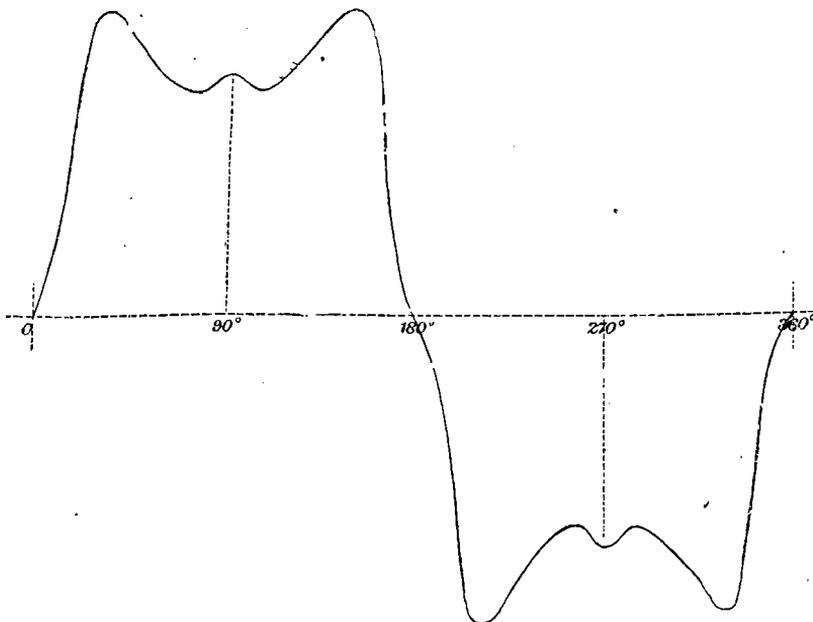


FIG. 52.

représente la courbe afférente à ce cas, donnée dans le travail du docteur Isenbeck, et la figure 53 la courbe de potentiel que j'ai intégrée d'après elle. L'inspection de la figure 52 montre qu'à partir de 0 degré l'induction commence par croître pour atteindre un maximum vers 20 degrés où la bobine arrive en face de l'une des extrémités de la pièce polaire enveloppante. A partir de ce point, bien

que l'induction soit un peu moindre, elle possède encore une valeur élevée, présentant un léger accroissement momentané lorsque la bobine passe devant le pôle à 90 degrés, et l'on trouve un autre maximum vers 160 degrés quand la bobine arrive en regard de l'autre extrémité de la pièce polaire. La courbe intégrée (fig. 53) indique ce qui se passerait au collecteur pour l'ensemble des bobines élémentaires d'un anneau Pacinotti ou Gramme. Le potentiel s'élève constamment de 0 degré jusqu'à un point voisin de 180 degrés. Ce n'est cependant pas encore la perfection absolue.

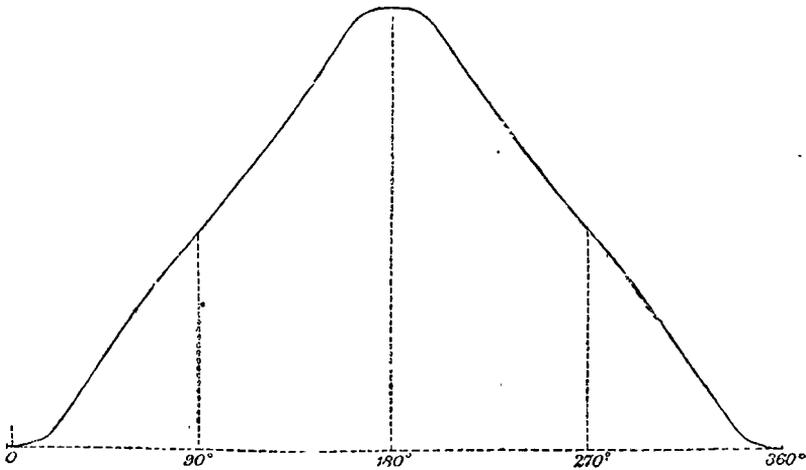


FIG. 53.

Dans ce cas, en effet, la courbe du potentiel s'élèverait en forme d'onde parfaitement harmonique, comme l'indique la figure 40. La figure 53 s'en écarte sensiblement en ce que la courbe est convexe entre 0 et 90 degrés et concave entre 90 et 180 degrés ; mais elle ne présente pas d'inversion. Cette amélioration s'explique aisément : le champ magnétique — tel qu'il est constitué entre la pièce polaire et le noyau — est *plus tendu* et la densité des lignes de force dont il est formé est plus uniforme. J'avais déjà prouvé ce fait expérimentalement dès 1878, en examinant simplement, à l'aide de limaille de fer, les lignes de force dans un champ magnétique ainsi constitué ; les fantômes de limaille obtenus et fixés sur une feuille de verre passée à la gomme avaient été envoyés au regretté Alf. Niaudet,

qui m'avait demandé de les étudier pour son compte. La figure 54 montre le champ réel entre les pièces polaires et l'anneau de fer qu'elles embrassent. Si tendues que soient, comme on le voit, les lignes de force dans l'étroite région qui les sépare, elles ne sont pas également distribuées et se trouvent un peu plus denses en regard des extrémités des pièces polaires.

Examinons maintenant un autre cas observé par le docteur Isenbeck. L'introduction, à l'intérieur de l'anneau, d'un aimant ayant son pôle S. en regard du pôle S. extérieur et son pôle N. en

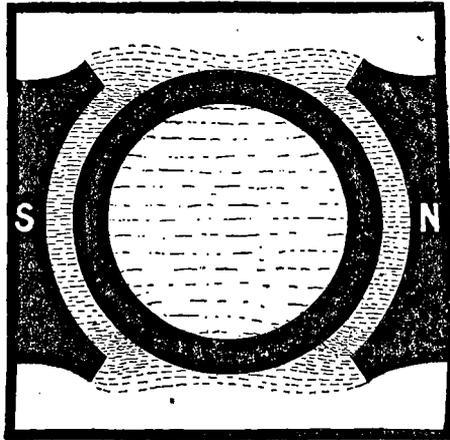


FIG. 54.

regard du pôle N. extérieur vient accroître l'effet produit. La courbe d'induction pour ce cas est représentée dans la figure 55. Il y a, comme on le voit, deux maxima en des points situés un peu au delà des extrémités des pièces polaires, comme précédemment; mais on trouve entre elles un maximum encore plus élevé juste à égale distance des pôles. Cette courbe a également été intégrée à l'aide de l'appareil de M. Vernon-Boys; la figure 56 donne cette courbe de potentiel. Elle s'approche davantage de la forme d'onde harmonique; elle est concave de 0 à 90 degrés et convexe de 90 à 180 degrés.

Passons maintenant des recherches du docteur Isenbeck et des courbes de potentiel intégrées que j'en ai déduites à d'autres études que j'ai entreprises dans le but de jeter quelque lumière sur

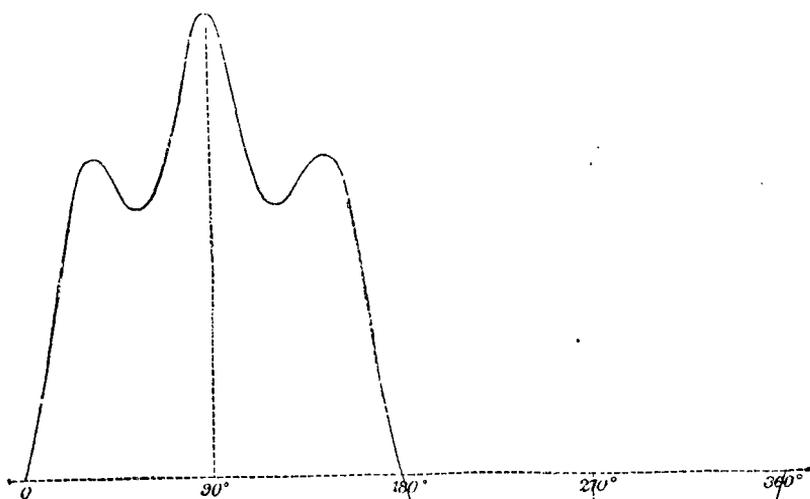


FIG. 55. — Courbe d'induction.

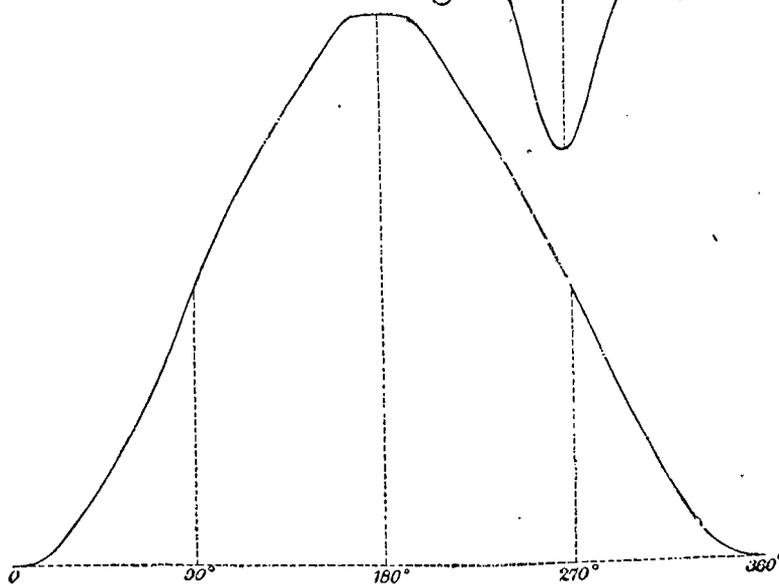


FIG. 56.

la question de préférence à accorder à la forme d'armature de Pacinotti avec ses dents de fer en saillie ou à la forme Gramme dans laquelle le noyau de fer est entièrement recouvert de fil. On a affirmé, sans fournir, que je sache, de raison à l'appui, que l'anneau Gramme était une amélioration de celui de Pacinotti. L'anneau de Pacinotti était en fer massif avec dents en saillie tant à l'extérieur qu'à l'intérieur, les bobines élémentaires étant roulées

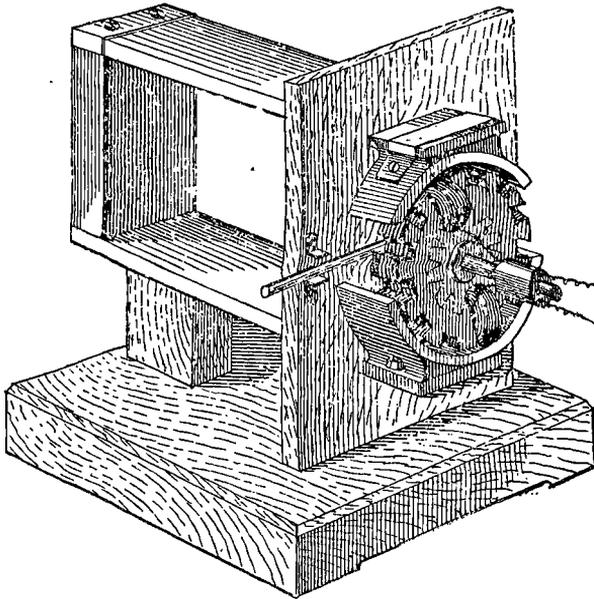


FIG. 57. — Appareil pour l'étude de l'Induction dans les armatures.

entre ces dents. Celui de Gramme est constitué soit par une seule pièce de fer, soit par un faisceau de fils de fer, les bobines élémentaires recouvrant de leurs spires la surface entière. La question de supériorité de l'anneau Gramme ou de celui de Pacinotti peut être aisément traitée par l'expérience ; et l'expérience seule peut déterminer s'il vaut mieux conserver toujours une épaisseur de fil entre les pièces polaires et le noyau, ou augmenter l'intensité du champ magnétique à l'aide de dents de fer en saillie renforçant puissamment les lignes de force. L'appareil construit par moi pour l'étude de cette question est représenté par la figure 57.

Il se compose d'abord d'un système d'aimants montés sur un

bâti de manière à constituer un champ magnétique; des pièces polaires peuvent ensuite s'y adapter ou en être enlevées à volonté; il y a en réalité trois jeux de pièces polaires de différentes formes qui permettent de modifier les conditions de l'expérience. Entre les pôles se trouve un axe de bronze sur lequel on peut monter les armatures. Ces armatures sont également au nombre de trois. L'une d'elles est représentée dans les figures 58 et 59 et se compose de deux bobines de fil fin roulées sur un anneau de bois; une seconde armature tout à fait analogue n'en diffère que par la nature de l'anneau qui est en fil de fer; la troisième (représentée

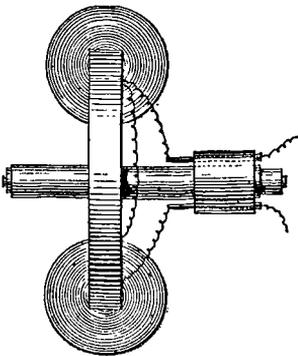


FIG. 58.

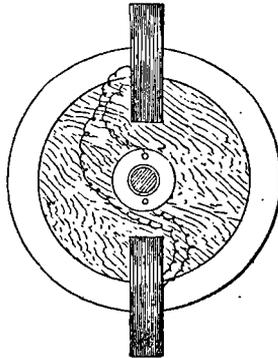


FIG. 59.

Armature d'expérience.

en place dans la fig. 57) comporte un anneau denté constitué par des plaques de tôle douce découpées et serrées à plat l'une contre l'autre. Sur chacune de ces armatures sont roulées deux bobines élémentaires situées aux extrémités d'un même diamètre. Les bobines contiennent exactement les mêmes longueurs de fil de cuivre recouvert de soie et provenant de la même botte. La section droite du noyau à l'intérieur de chacune de ces bobines est dans chaque cas un carré d'un centimètre de côté, de sorte que le nombre de circonvolutions dans chaque bobine est aussi identique que possible. On peut introduire à volonté dans le champ magnétique l'une quelconque de ces armatures et la relier à un galvanomètre. Une manivelle fixée sur l'armature permet de la faire mouvoir.

J'ai employé deux méthodes pour comparer les bobines. L'une d'elles consiste à faire tourner brusquement l'armature d'un quart

de révolution de manière à faire avancer les bobines de 0 à 90 de grés, auquel cas la déviation de l'aiguille du galvanomètre — qui est à oscillations lentes — donne une mesure de l'induction total produite dans l'armature. En voici les résultats :

GRAMME.	GRAMME.	PACINOTTI.
Anneau de bois.	Anneau de fer.	Anneau de fer denté.
5	24	50

L'autre mode d'emploi de ces armatures d'expérimentation consiste à faire avancer brusquement les bobines d'une distance égale

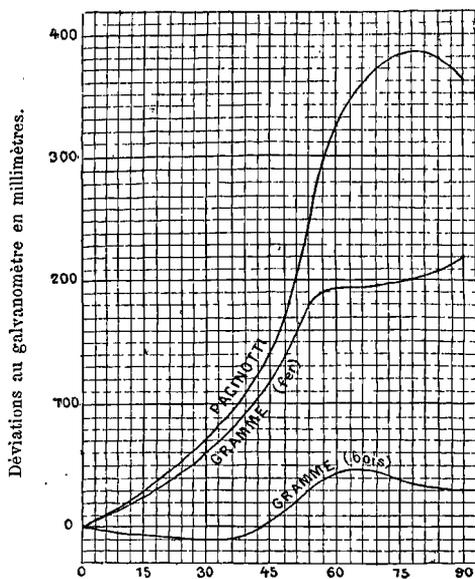


FIG. 60.

à leur propre épaisseur, les bobines venant ainsi occuper successivement différentes positions dans le champ. On observe comme précédemment les déviations du galvanomètre. Chacune des bobines occupe très approximativement une épaisseur angulaire de 15 degrés. D'après cela, on dispose deux petits arrêts limitant à

cette course le mouvement de la manivelle ; un cercle gradué situé par derrière permet d'ailleurs de repérer exactement toutes les positions des bobines. Si l'on donne aux bobines six impulsions successives leur faisant parcourir chaque fois une distance angulaire égale à leur épaisseur, en partant de 0 degré, la sixième impulsion conduit à 90 degrés. Les trois courbes ainsi obtenues sont réunies dans la figure 60 et le tableau suivant donne les chiffres correspondants des déviations au galvanomètre :

IMPULSIONS.	GRAMME.	GRAMME.	PACINOTTI.
	— ANNEAU DE BOIS.	— ANNEAU DE FER.	— ANNEAU DE FER DENTÉ.
0° — 45°	— 5	23	30
15° — 30°	— 10	60	70
30° — 45°	0	120	140
45° — 60°	45	195	320
60° — 75°	40	200	380
75° — 90°	30	220	260

Ces chiffres ne laissent place à aucun doute sur la solution de la question. Le type d'anneau de Gramme, loin d'être une amélioration de l'anneau de Pacinotti, est évidemment un pas en arrière, à égalité, bien entendu, de prix de construction, de capacité d'échauffement et autres conditions du même ordre.

CHAPITRE V

RÉACTIONS DANS L'ARMATURE ET DANS LE CHAMP MAGNÉTIQUE

Quand une machine dynamo fonctionne, il s'y produit une série de nouveaux phénomènes dus aux réactions magnétiques et électriques mises en jeu entre l'armature et le système inducteur, et entre les sections individuelles des bobines de l'armature. Ces réactions se manifestent par l'inclinaison qu'il faut donner aux balais relativement au diamètre de commutation (en d'autres termes par l'angle de « calage » des balais), par des étincelles aux balais, par des variations dans cet angle de calage et cette production d'étincelles quand la vitesse ou le nombre des lampes alimentées (s'il s'agit d'éclairage) viennent à varier, par un échauffement des pièces polaires des inducteurs, et par un écart entre les quantités de travail mécanique fourni à l'arbre et de travail électrique développé dans le circuit extérieur. La nature de ces réactions demande à être étudiée avec la plus grande attention.

Nous avons vu (p. 52 et fig. 39) qu'une armature ordinaire quelconque du type cylindrique ou en anneau peut être assimilée dans son fonctionnement à une pile voltaïque double, les deux séries de bobines élémentaires en circuit agissant comme deux rangées d'éléments réunies en « arc parallèle », « quantité » ou « dérivation ». Il nous faut maintenant montrer qu'une armature en anneau peut être également considérée comme un aimant double. Imaginons un demi-anneau en fer roulé, comme l'indique la figure 61, d'une spire parcourue par un courant; il s'aimantera,

comme chacun sait, et présentera un pôle N. à l'une de ses extrémités, et un pôle S. à l'autre. Si l'on enveloppe de la même manière un anneau complet, mais cette fois avec un enroulement sans fin, et qu'on fasse alors pénétrer en un point des courants électriques issus d'une pile ou autre source, ces courants parcourant les deux

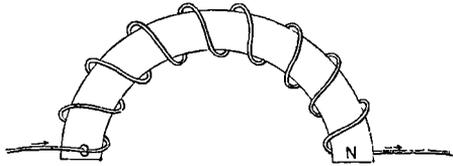


FIG. 61.

moitiés de l'anneau pour émerger par un conducteur convenable en un point situé du côté opposé, chacune des moitiés de l'anneau s'aimantera. Il se produira, si les courants circulent comme l'indi-

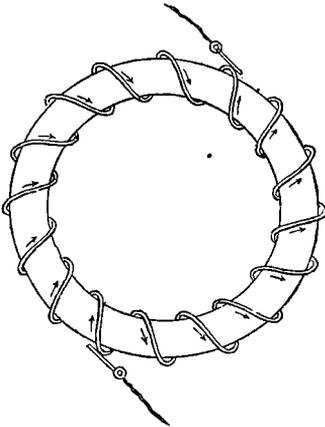


FIG. 62.

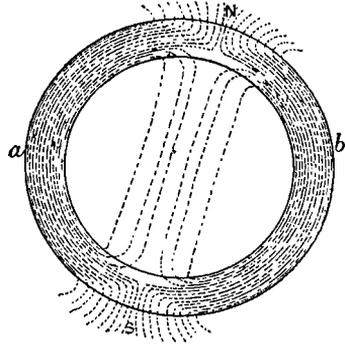


FIG. 63.

quent les flèches dans la figure 62, un double pôle S. au point par lequel pénètrent les courants, et un double pôle N. au point où ils quittent la spire. Les courants circulant dans un anneau Gramme tendront par conséquent à aimanter l'anneau de cette façon. Voyons maintenant comment se distribue cette aimantation dans l'intérieur même du fer. La figure 63 montre la direction générale des lignes magnétiques de force dans le fer même ; leurs points d'émer-

gence dans l'air sont les pôles effectifs de l'anneau considéré comme un aimant. Cette figure 63 demande à être attentivement comparée à la figure 62. On y voit que, si la majorité des lignes de force s'échappe extérieurement dans l'air à la circonférence extérieure, un petit nombre d'entre elles se fraye un chemin à travers l'espace libre intérieur à l'anneau, du pôle N. au pôle S. Cette partie du champ magnétique serait absolument nuisible dans une dynamo réelle si le nombre de ces lignes de force n'était pas aussi minime.

Revenons maintenant à la figure 54, page 67, et examinons la manière dont le système inducteur tend à aimanter l'anneau quand il est maintenu au repos, ou tout au moins quand les spires de l'armature ne sont parcourues par aucun courant. Il est évident que pendant le fonctionnement de la dynamo, si les balais étaient calés sur un diamètre à angles droits avec la ligne joignant les pôles, l'anneau serait à la fois soumis à deux actions magnétisantes : celle des inducteurs tendant à l'aimanter comme l'indique la figure 54, et celle de l'armature tendant à y déterminer l'aimantation indiquée par la figure 63. Le résultat de cette double action sera une aimantation de direction oblique par rapport à la ligne neutre, les lignes de force dans le champ magnétique entre l'inducteur et l'induit étant tordues sur elles-mêmes autour de celui-ci. Mais si le champ magnétique se trouve ainsi tordu sur lui-même, les balais doivent être déplacés ; autrement la commutation n'aurait pas lieu au moment précis où le nombre des lignes de force est maximum. Cette première réaction des courants de l'armature sur l'aimantation de l'anneau et sur les lignes magnétiques du champ montre que les balais doivent être d'après elle calés sous un certain angle, et que cet angle doit être d'autant plus grand que les courants parcourant l'armature sont eux-mêmes plus intenses.

Cette nécessité du déplacement des balais d'une dynamo par rapport à la ligne neutre a été primitivement attribuée à une certaine inertie dans la désaimantation du fer de l'armature, et aujourd'hui encore MM. les professeurs Ayrton et Perry sont d'avis que le déplacement des pôles est dû en partie à cette inertie de désaimantation. Je ne crois pas cependant cette opinion soutenable. On n'a pas encore pu donner la preuve expérimentale positive de quoi que ce soit d'analogue à un véritable retard magnétique ; l'inertie

magnétique apparente de fortes masses de fer est due, comme on peut le démontrer, à l'induction de courants internes¹; et c'est précisément pour cette raison que personne n'emploie du fer massif dans la construction des carcasses des induits. On n'a pas constaté davantage que des feuilles minces de tôle ou du fil de fer, tels qu'on les emploie dans la constitution des carcasses des armatures, fussent plus lents à se désaimanter qu'à s'aimanter. C'est même probablement l'inverse qui a lieu, et, jusqu'à preuve expérimentale contraire, nous admettrons qu'il n'y a aucun retard magnétique dans des noyaux de fer convenablement divisés. Pour plus amples explications à cet égard, voir l'Appendice V.

En 1878, le regretté Ant. Breguet émit l'idée que la raison de la position oblique du diamètre de commutation pouvait résider dans l'influence du courant circulant dans les spires de l'induit, influence qui tendait à produire dans le fer de l'armature une aimantation à angles droits avec celle résultant de l'action des électro-aimants. — Breguet montra, comme nous l'avons dit précédemment, que les lignes de magnétisation dans le champ présentaient une résultante de direction oblique et que, par suite, *le diamètre de commutation* étant perpendiculaire à cette direction, les balais devaient dès lors être déplacés d'un angle égal. Clausius, dans sa récente théorie, accepte cette manière de voir et adopte pour angle du champ magnétique résultant celui dont la tangente est égale au rapport des deux forces magnétisantes dues l'une aux électro-aimants, l'autre au courant dans l'armature. Nous allons voir tout à l'heure que cette règle n'est pas exacte, et que c'est le *sinus*, et non pas la tangente, de l'angle de calage qui représente le rapport de ces deux forces.

On peut cependant placer ici une remarque intéressante : si l'on admet comme loi de première approximation que le sinus ou la tangente de l'angle de calage représente le rapport entre la puissance d'aimantation des spires de l'armature et celle des électro-

1. On m'informe de certaines expériences récentes de MM. Wartburg et Hönig qui paraîtraient prouver que l'échauffement des noyaux de fer est dû à « une friction magnétique » interne plutôt qu'à des courants parasites induits; mais ces expériences ne sont nullement concluantes. L'Appendice V, auquel nous renvoyons le lecteur, jette plus de lumière sur la réalité des faits.

aimants, ce déplacement peut être extrêmement réduit; il suffit d'augmenter la puissance relative des électro-aimants, modification avantageuse à bien d'autres égards. Toute la pratique confirme la règle que le moment magnétique des électro-aimants doit être très grand relativement à celui de l'armature¹. Celle-ci doit d'ailleurs contenir assez de fer pour approcher de son point critique de saturation magnétique quand la dynamo travaille à son maximum. Si le fer est en quantité moindre, il se saturera à un certain point, et quand on emploiera des courants d'intensité supérieure, le calage des balais devra changer, car l'effet magnétique dû au courant dans l'armature prendra alors moins d'importance comparative-ment à celui résultant des électro-aimants. Pour la même raison, le calage sera plus constant quand les électro-aimants seront au-dessous de leur point de saturation que lorsqu'ils seront complètement saturés. Bref, toute cause qui tend à réduire l'angle de déplacement des balais rend le calage plus constant et tend par suite à diminuer les étincelles au collecteur. Et la meilleure manière d'assurer ce résultat consiste naturellement à employer une quantité considérable de fer, — et du fer le plus doux possible, — tant pour les électro-aimants que pour l'armature, car les courants circulant alors dans celle-ci risquent moins de troubler le champ magnétique.

En ce qui touche l'aimantation des électro-aimants, il est à noter en passant que les *caractéristiques* (voir Chap. XVII), si employées aujourd'hui dans l'étude du fonctionnement des machines dynamos, et qui donnent l'accroissement de la force électromotrice de la machine en fonction de l'intensité correspondante du courant, sont regardées parfois, bien qu'assez inexactement, comme représentant l'accroissement d'aimantation des électro-aimants². Or, si l'aimantation des électro-aimants peut pratiquement atteindre la saturation, il n'y a cependant pas, avec un courant encore plus

1. Les électro-aimants doivent avoir une puissance d'aimantation dépassant de beaucoup celle de l'armature. J'ai eu occasion de voir des dynamos dans lesquelles la puissance de l'armature était supérieure à celle des électro-aimants. Quand les balais étaient calés à une faible distance angulaire de la ligne neutre, on avait une bonne force électromotrice, mais énormément d'étincelles. Quand cette distance était considérable, les étincelles disparaissaient, mais la force électromotrice tombait également.

2. Ce point est discuté au Chap. xvii, p. 294.

puissant, d'aimantation inférieure à la saturation. Les caractéristiques de presque toutes les dynamos montées en série présentent toutefois — du moins pour de grandes vitesses — une tendance marquée à s'abaisser après avoir passé par un maximum; et pour certaines machines, telles que celle de Brush (voir fig. 176), la diminution de force électromotrice est très accentuée. La force électromotrice diminue, mais il n'en est pas de même de l'aimantation des électro-aimants. Le docteur Hopkinson a donné dernièrement une explication de cet abaissement de la caractéristique

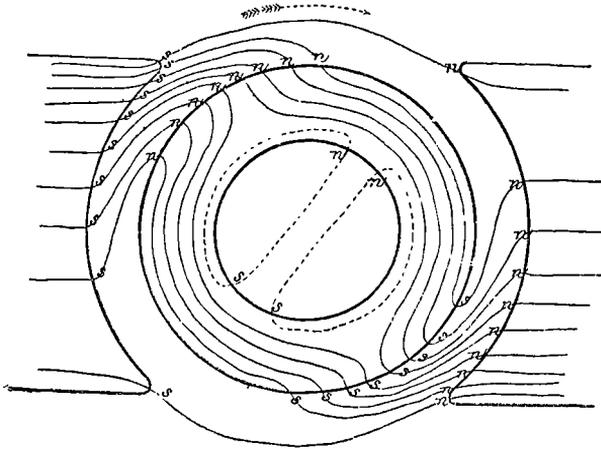


FIG. 64.

dans sa conférence sur « l'éclairage électrique » à l'Institut des Ingénieurs civils de Londres; il l'attribue à la réaction de *self-induction* et de mutuelle induction entre les bobines élémentaires de l'armature. Nul doute que cette cause ne contribue à l'effet observé, toutes les réactions de ce genre diminuant la force électromotrice effective. J'incline cependant à penser que cet effet est dû en majeure partie au déplacement de la ligne effective du champ magnétique par suite de ce que le fer des électro-aimants se sature avant celui de l'armature. Il est au moins significatif que dans la machine Brush, où la diminution de force électromotrice est très considérable, il y a aussi une masse de fer disproportionnée dans l'armature et un calage très incertain des balais.

Nous sommes loin encore d'avoir terminé notre étude des réactions dans le champ magnétique. Si nous nous reportons à la figure 54 qui représente l'état des choses quand aucun courant ne passe dans l'anneau, nous voyons que, dans le champ entre l'anneau et les pièces polaires, les lignes de force sont sensiblement parallèles et uniformément distribuées, malgré toutefois une légère tendance à devenir plus denses dans le voisinage des extrémités extérieures des pièces polaires. Examinons maintenant l'effet produit par l'induction dans l'anneau d'un courant qui vient y ajouter une nouvelle aimantation comme l'indique la figure 63. Ce résultat, soigneusement étudié pour un cas particulier, est représenté par les lignes de la figure 64 où il est toutefois un peu exagéré. Supposons les balais placés tout d'abord de manière à toucher les deux

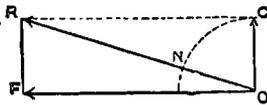


FIG. 65.

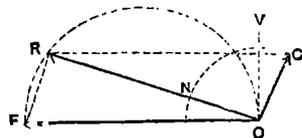


FIG. 66.

points situés sur le diamètre vertical. Les inducteurs tendent à aimanter l'anneau en développant un pôle N. au point situé à l'extrémité gauche de son diamètre horizontal, et les courants tendent à l'aimanter de telle façon que son point le plus haut, où se trouve le balai, soit un pôle N. Dès lors il se produira une aimantation résultante dans une direction oblique. Représentons par une ligne OF (fig. 65) la force magnétisante due aux inducteurs, et par une ligne perpendiculaire OC la force magnétisante due au courant passant dans l'induit; la diagonale OR du parallélogramme construit sur ces deux lignes représentera alors la direction de l'aimantation résultante. En décrivant du point O comme centre un cercle de rayon OC, son point N d'intersection avec la diagonale OR donnera la distance de déplacement du pôle résultant induit par rapport à la ligne horizontale. Mais le diamètre de commutation où se fait le contact des balais doit être à angles droits avec la ligne des pôles résultants dans l'anneau, si l'accroissement du potentiel autour du commutateur est régulier (ainsi que nous l'avons expliqué au chapitre précédent). *Nous devons donc caler les balais, sous un*

certain angle, en les déplaçant autour du collecteur jusqu'à ce que le diamètre de commutation soit à angles droits avec ON. Mais le déplacement de OC modifiera également un peu la position de N. Il est aisé de déterminer cette nouvelle position. Sur OF comme diamètre (fig. 66) décrivons une demi-circonférence et menons la corde FR égale à la longueur que doit avoir OC. Traçons OC parallèle et égale à FR, ainsi que la diagonale OR comme précédemment. L'angle CON est droit, et N est très voisin de la position qu'il occupait avant. Soit OV une ligne verticale; dès lors l'angle VOC = angle FOR est l'angle de calage. Toute cette opération de rectification du calage est censée faite dans la figure 64.

Mais un coup d'œil jeté sur cette figure 64 montre également que le magnétisme de l'anneau réagit sur celui des pièces polaires. Les lignes de force dans le fer de la pièce polaire de gauche sont plus massées vers l'angle supérieur, et vers l'angle inférieur dans la pièce polaire de droite, comme si la polarité avait été attirée vers le haut d'un côté et vers le bas de l'autre. La densité du champ n'est plus du tout ce qu'elle était dans la figure 54. Les lignes de force du côté gauche supérieur sont serrées les unes contre les autres et tordues transversalement. Le pôle N. résultant de l'anneau — marqué n,n,n , où les lignes de force émergent de l'anneau, — attire le pôle S. — marqué s,s,s , où les lignes pénètrent dans le champ magnétique, — et le moteur qui entraîne la dynamo a un travail considérable à effectuer pour arracher l'armature à ces attractions. Plus le courant dans l'armature est considérable, plus les pôles sont intenses dans l'anneau; et plus est énergique dans les inducteurs l'attraction de n,n,n , vers s,s,s , plus la machine à vapeur a de travail à effectuer pour maintenir la vitesse. Il est à remarquer également dans cette figure qu'un *petit nombre* des lignes de force dues au passage du courant dans l'armature — elles sont représentées en pointillé au nombre de deux sur la figure — passe transversalement à l'intérieur de l'anneau et ne contribue en rien au champ extérieur. La direction oblique de ce champ interne marque l'angle de calage des balais. On remarquera en outre que les couches les plus internes du fer de l'anneau sont aimantées différemment des couches externes, car le pôle n des couches externes du fer occupe une région située obliquement sur la gauche, tandis que le

pôle n des couches internes se trouve à droite du point le plus haut. Tous ces phénomènes, — la tension du champ, — sa concentration sous les pièces polaires, — la faiblesse du champ intérieur, — l'écart entre les positions des pôles induits sur les côtés interne et externe de l'anneau, — peuvent être réellement observés dans une dynamo. La figure 67 montre l'effet produit expérimentalement sur de la limaille de fer quand on met un anneau aimanté entre les pôles S. N. d'un champ magnétique, qui tend à induire en lui des pôles $n's'$, et quand on donne à ses propres pôles $n s$ l'inclinaison convenable. On peut la comparer avec intérêt aux figures 54 et 64.

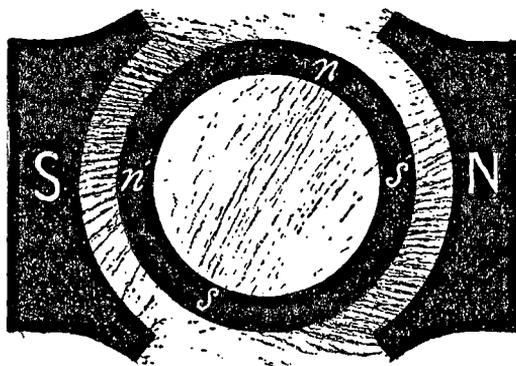


FIG. 67.

Peut-être objectera-t-on que dans la figure 64 les pôles internes, tels qu'ils sont marqués, ne sont pas exactement à angles droits avec les pôles externes de l'anneau. Il n'en est pas non plus ainsi dans les dynamos réelles. La position des pôles internes est déterminée par le calage des balais, et *les balais sont placés de telle façon que le diamètre de commutation se trouve à angles droits avec le diamètre pour lequel la densité moyenne du champ est maxima*. Cette direction n'est pas absolument en face des pôles extérieurs induits dans l'anneau, parce que les pôles induits dans l'anneau sont toujours un peu en avance sur les pôles des inducteurs, et ont une tendance à être ramenés en arrière vers ceux-ci.

Retournant un instant à la figure 66, nous voyons que, si OF ou RC représente l'intensité de la force magnétique due aux in-

ducteurs, et OC ou FR celle due au courant dans l'induit, on a

$$\frac{OC}{RC} = \sin CRO = \sin FOR,$$

c'est-à-dire que le rapport des deux champs magnétiques est proportionnel au *sinus* de l'angle de calage, et non à sa tangente comme le prétendait Breguet et comme l'admet le professeur Clausius.

Dans le cas des armatures cylindriques, les phénomènes, quoique du même genre, sont un peu moins faciles à exposer. En raison de ce que l'enroulement enveloppe complètement la surface extérieure de l'armature, les courants dans quelques-unes des spires sont en partie neutralisés dans leur action magnétisante sur le noyau par les courants dans les spires transversales; il en résulte que la polarité due au courant n'est pas aussi marquée que dans les armatures en anneau. Il ne peut d'ailleurs s'y constituer sous aucun prétexte de champ magnétique interne. Mais, à ces exceptions près, les considérations ci-dessus développées s'y appliquent également.

Avant d'avoir épuisé notre étude des réactions dans l'armature, il nous reste encore à examiner certains effets dus à la *self*- ou auto-introduction et à la mutuelle induction.

Quand une armature fonctionne, la moitié du courant suit les bobines élémentaires de l'une des moitiés de l'anneau — celles de gauche par exemple, — et l'autre moitié du courant va à l'autre moitié de l'anneau — soit à droite. Si le balai est près du sommet, le courant va de gauche à droite à travers la section située à gauche du balai, et de droite à gauche dans celle qui est située à sa droite. Mais la section à gauche du balai avance (vers la droite dans tous les diagrammes contenus dans ce livre) et arrive à l'autre moitié de l'anneau. Il est évident dès lors qu'au passage de chaque section sous le balai le courant qui la parcourt se trouve arrêté et renversé. Naturellement, si les dispositions sont bien prises, la section en question n'induit pas par elle-même de courant au moment où elle passe sous le balai, mais elle reçoit le courant engendré dans les autres sections. Pendant un instant d'ailleurs les deux lames du collecteur, auxquelles sont reliées les

extrémités de cette section de la bobine, sont *simultanément* en contact avec le balai; et par suite cette section de la bobine se trouve pendant cet instant très court mise en court circuit.

Or, nous savons que tout courant électrique possède une propriété appelée tantôt « inertie électrique », tantôt « *self*-induction ou auto-induction », en vertu de laquelle il tend à poursuivre sa marche en avant. De même qu'un volant une fois mis en marche tend à continuer son mouvement quand la cause qui l'a déterminé cesse d'agir; de même un courant circulant autour d'une bobine tend à continuer à s'écouler même après la rupture de toute connexion avec la source dont il émane. Ce phénomène ne dure généralement, il est vrai, qu'une petite fraction de seconde, mais le courant *tend* à poursuivre son chemin, comme s'il était doué d'inertie. On sait également que cette quasi-inertie est intimement liée à ses propriétés magnétiques (voir dans l'Introduction, p. 10, les observations à cet égard), et que c'est dans son propre champ magnétique que réside principalement cette inertie de *self*-induction.

Un courant circulant autour d'un noyau de fer possède une inertie électrique (ou *self*-induction) beaucoup plus grande, parce qu'il a un champ magnétique plus intense, qu'un courant dans une bobine sans noyau de fer. C'est en raison de cette propriété qu'il faut dépenser de l'énergie pour *arrêter* un courant, et cette énergie peut être considérable. Nous savons, pour en revenir à une analogie d'ordre mécanique, qu'il faut dépenser beaucoup d'énergie pour mettre une meule en mouvement; une fois qu'elle tourne, il n'est presque plus besoin de travail pour la maintenir en marche, il en faut juste assez pour vaincre les frottements des pivots. Mais si l'on veut arrêter cette meule, en maintenant par exemple une pièce de bois comme frein contre son entraînement, elle rendra l'énergie qui lui a été fournie et cette restitution d'énergie se manifesterá sous forme de chaleur. De même le courant électrique circulant dans une bobine possède une certaine quantité d'énergie, et si on l'arrête en ouvrant le circuit, cette énergie se manifeste par une étincelle dite (mais à tort) d'« extra-courant ». Si la bobine est mise en court circuit, son courant se trouve aussi arrêté par la quasi-friction intérieure communément appelée la « résistance » du fil, et le fil s'échauffe.

Or, tous ces phénomènes ont évidemment leur pendant dans ce qui a lieu quand les sections des bobines passent sous les balais. Dans chaque section le courant tend à continuer sa marche, et il la poursuit pendant un court instant après son contact avec le balai. L'énergie de cette section est alors consommée en échauffement du fil de cuivre pendant l'intervalle de temps où elle est mise en court circuit; et après ce passage, il faut dépenser de l'énergie pour y lancer le courant en sens contraire. Toutes ces réactions se produisent naturellement au détriment du courant fourni par la dynamo : la perte par mise en court circuit est particulièrement préjudiciable. M. Joubert a montré¹ que la perte d'énergie due aux simples renversements de courant dans les sections d'une armature en anneau est égale à $\frac{nU i_a^2}{4}$ par seconde, en désignant par n le nombre de tours par seconde, par U le coefficient de self-induction pour l'anneau entier, et par i_a l'intensité du courant dans l'armature. Plus récemment, MM. les professeurs Ayrton et Perry ont donné une autre expression du même phénomène². Du moment où l'énergie par seconde transportée par un courant passant à travers une résistance r est égale à $r i^2$, il est évident que l'énergie perdue par seconde par self-induction est la même que s'il était introduit dans l'armature une résistance additionnelle de valeur $r = \frac{nU}{4}$. Il y a, par suite, dans une armature en mouvement, un accroissement *apparent*³ de résistance

1. *L'Électricien*, t. V, p. 302, avril 1883.

2. *Journal de la Société des Ingénieurs télégraphistes et électriciens* (Londres), t. XII, n° 49, 1883, où cependant les lettres n et U sont employées dans un sens un peu différent.

3. Cette manière d'envisager la question a été très vivement contestée par M. Hospitalier (voir *L'Électricien* des 15 octobre et 1^{er} novembre 1884, t. VIII, pp. 379 et 392). Sans vouloir nous interposer entre deux professeurs, nous croyons qu'au point de vue théorique absolument rigoureux, M. Hospitalier a raison; mais il nous semble s'être laissé un peu emporter par la discussion en faisant attribuer par le professeur S. P. Thompson l'énergie perdue par l'effet de la self-induction à un accroissement de résistance de la bobine. Notre auteur dit simplement que les choses se passent *comme s'il y avait* augmentation de résistance de l'induit. Il y a, dit-il, accroissement *apparent* de résistance. Cette constatation d'analogie n'est nullement une affirmation, et nous estimons qu'au fond les deux savants sont parfaitement d'accord. — Ce n'est pas la première fois d'ailleurs qu'une force contre-électromotrice est pratiquement assimilée dans ses effets à une résistance. (N. du T.)

proportionnel à la vitesse, et cet accroissement apparent, dû à la self-induction, ne peut être surmonté par une augmentation du nombre des sections de l'armature. On peut le réduire jusqu'à un certain point par l'emploi dans l'armature de plus de fer et de moins de tours de fil, ou en d'autres termes par une diminution du moment magnétique de l'induit au profit de l'inducteur dont la supériorité s'accroît ainsi.

Certaines formes d'armatures sont particulièrement défectueuses en ce qui touche l'induction considérable produite entre les sections ou parties voisines de l'armature. L'armature Bürgin, dans laquelle six ou huit anneaux sont juxtaposés sur un même arbre, se ressent des effets d'induction entre chacune de ses sections et celles qui appartiennent aux anneaux situés à sa droite et à sa gauche ; et on n'a pu mitiger ce défaut que par une alternance très soignée de leurs positions respectives. Dans les armatures du type de Niaudet et de Wallace-Farmer, chacune des bobines parallèles agit par induction sur sa voisine. Sans aucun doute l'armature où ce défaut se fait le moins sentir est l'armature cylindrique de Siemens (Alte-neck) employée dans les machines Siemens, Edison, Weston, Hipp, etc. Le professeur Clausius¹ a montré que, après sa mise en court circuit au contact d'un balai, une bobine élémentaire exerce une action inductrice funeste sur la bobine qui la précède immédiatement, et que cette action est proportionnelle au nombre de spires de cette bobine élémentaire. On peut, en conséquence, l'atténuer en augmentant le nombre des sections, ce qui permet de diminuer le nombre des spires de fil dans chacune des sections de l'armature. Les étincelles aux balais sont également dues en grande partie à la self-induction. Un grand nombre de formes d'armatures, fonctionnant sans étincelles et avec un calage très constant quand elles sont formées d'un petit nombre de tours de gros fil de faible résistance pour l'alimentation de lampes à incandescence, donneraient beaucoup d'étincelles et exigeraient un calage très variable des balais si on les roulait d'un grand nombre de tours de fil fin pour en obtenir une force électromotrice considérable destinée à

1. *Annales de Wiedemann*, novembre et décembre 1883, et *Philosophical Magazine*, janvier et février 1884.

alimenter un certain nombre de lampes à arc en série. Cette différence n'est qu'un effet de self-induction aussi bien que toutes les irrégularités précédentes.

Cette inertie électrique dans les sections affecte légèrement le calage à donner aux balais et réagit également sur les bobines voisines. Toutes les fois qu'une bobine est mise en court circuit, l'élan soudain avec lequel son propre courant la parcourt tend à arrêter par mutuelle induction le courant dans la bobine qui la suit, et à accélérer le courant inverse dans celle qui la précède. On diminue ces actions en augmentant le nombre des sections et faisant par suite les sections individuelles plus petites. La self-induction s'étend même au fer des noyaux. Dans chaque molécule de fer, au moment où elle atteint la position dans laquelle son aimantation doit se renverser, il se développe un courant interne qui retarde le renversement du magnétisme et donne une *apparence* de retard dans son aimantation; en même temps il s'échauffe. Cet effet peut être également atténué par l'emploi de fer en feuilles minces et par des dispositions déterminant une inversion progressive du magnétisme au lieu d'un brusque renversement.

La self-induction joue un rôle considérable dans les machines à courants alternatifs, aussi bien d'ailleurs que dans toutes les machines dynamos en général; mais nous ne pouvons quant à présent nous appesantir davantage sur ses effets.

Il n'y a qu'un moyen de diminuer toutes ces réactions nuisibles, et heureusement ce moyen est très simple. On verra au chapitre sur la Théorie algébrique de la dynamo que la force électromotrice d'une machine est proportionnelle à trois éléments : la vitesse n , l'intensité moyenne H du champ magnétique, et la « surface équivalente totale » A des spires de l'armature. Mais ce dernier terme est lui-même proportionnel au nombre des tours de fil sur l'armature; et par suite, pour des dimensions données d'armature, les réactions inductrices sont également proportionnelles à A . Si nous pouvons diminuer A tout en augmentant l'un ou l'autre des autres termes, nous pourrions par là-même atténuer les réactions nuisibles en conservant néanmoins la même force électromotrice que précédemment. Or, il n'est pas bon d'accroître la vitesse, et d'ailleurs quelques-unes des réactions nuisibles, mécaniques (comme le frot-

tement) aussi bien qu'électriques, augmentent en même temps que cette vitesse. Il ne reste donc d'autre moyen que d'accroître Π , c'est-à-dire l'intensité du champ magnétique. On peut y arriver à l'aide d'électro-aimants d'une extrême puissance surpassant dans une énorme proportion la puissance magnétique de l'armature. Avec de grands électro-aimants, en fer forgé, et une abondance de fer dans l'âme de l'armature, on peut, sans accroître la vitesse, obtenir la même force électromotrice, tout en mettant moins de tours de fil sur l'armature. La machine idéale de l'avenir est une machine n'ayant dans chaque section qu'une seule spire de fil. Elle ne nécessitera dans la pratique aucun calage spécial des balais, ne donnera pas d'étincelles, et aura une résistance intérieure pratiquement *nulle*.

CHAPITRE VI

MOYENS DE GOUVERNER LES MACHINES DYNAMOS

Modes d'Excitation du champ magnétique.

Nous avons déjà fait allusion, au début de cet ouvrage, aux quatre méthodes simples d'excitation du magnétisme dans le champ où se meuvent les armatures ; mais nous n'avons rien dit des avantages ni des inconvénients de ces quatre systèmes, non plus que des combinaisons auxquelles ils peuvent se prêter.

Machine magnéto-électrique ou Magneto-dynamo. — Les machines magnétos (fig. 4, p. 4) offrent cet avantage, au moins en théorie, que (pour des courants égaux) leur force électromotrice est, à très peu de chose près, exactement proportionnelle à la vitesse de rotation ; toutefois, la différence de potentiel entre les bornes de la machine varie naturellement avec la résistance du circuit extérieur. Ces machines présentent par contre l'inconvénient que, l'aimantation permanente de l'acier ne pouvant atteindre le même degré que l'aimantation temporaire du fer doux, elles ne sont pas, à égalité de dimensions, aussi puissantes que d'autres dynamos.

Dynamo à excitation indépendante. — La machine dynamo à excitation séparée (fig. 3, p. 3) possède la même qualité que la machine magnéto : sa force électromotrice est indépendante des changements accidentels de résistance dans le circuit de travail ; mais elle est plus puissante. Elle offre en outre cet avantage que l'intensité du champ est réglable à volonté ; en faisant varier, en effet, soit la force électromotrice, soit la résistance dans le circuit

d'excitation, on modifie suivant les besoins l'intensité du champ magnétique. Mais elle a l'inconvénient d'exiger une machine excitatrice séparée.

Dynamo en série ou *Series-dynamo*. — La dynamo ordinaire ou en série (fig. 1, p. 2) est généralement moins coûteuse, à égalité de puissance, qu'aucun des autres types, en raison de ce que ses bobines sont d'une construction plus simple que celles d'une machine en dérivation, et qu'elle n'a pas besoin d'excitation auxiliaire. Mais elle a l'inconvénient de ne rien produire tant qu'elle ne tourne pas à une certaine vitesse où que la résistance du circuit n'est pas inférieure à une certaine limite. Elle est également sujette à un renversement de polarité, inconvénient sérieux quand la machine est destinée à des opérations électro-chimiques ou à la charge d'accumulateurs.

Tout accroissement de résistance dans le circuit de la machine montée en série diminue sa puissance de production de courant en ce qu'il réduit le courant dans les bobines des électro-aimants et affaiblit ainsi l'intensité du champ magnétique. Aussi la dynamo en série est-elle mieux appropriée à l'alimentation de lampes en arc parallèle que de lampes disposées en série. Toute lampe additionnelle introduite, si les lampes sont en série comme dans un circuit Brush, ajoute à la résistance du circuit et diminue la puissance de production de courant de la machine. Par contre, dans un montage en dérivation, une lampe additionnelle réduit la résistance totale offerte par le réseau du circuit, détermine l'augmentation du courant total, et contribue à augmenter la puissance de la machine à produire le courant nécessaire. Il est facile de régulariser les courants fournis par une dynamo en série en introduisant une dérivation de résistance variable dans le système inducteur, ce qui permet de modifier l'action magnétisante du courant.

Dynamo en dérivation ou *Shunt-dynamo*. — La machine *shunt* (fig. 2, p. 2) présente plusieurs avantages sur les autres types. Elle est moins sujette à renversement de polarité que la dynamo en série, et passe communément pour consommer moins de courant dans la production de son champ magnétique¹. Pour un sys-

1. Cette opinion n'est cependant pas fondée; il faut dépenser autant d'énergie électrique pour aimanter au même degré un électro-aimant, que sa bobine soit consti-

tème de lampes en série, la puissance productrice du courant augmente avec les exigences du circuit, car toute résistance supplémentaire laisse passer un courant additionnel dans la dérivation qui excite les électro-aimants, et augmente ainsi l'intensité du champ magnétique. D'un autre côté, la machine est beaucoup plus sensible aux inégalités de vitesse en raison de la self-induction considérable qui se produit dans le shunt. Ainsi que nous l'avons fait observer précédemment, quand de brusques changements se manifestent dans la force électromotrice qui agit dans un circuit complexe, les courants momentanés ainsi développés ne se distribuent pas dans les différentes parties du circuit simplement en raison inverse des résistances; leur distribution dépend également, et dans certains cas principalement, de la self-induction dans les diverses parties du système. Comme nous l'avons précédemment expliqué (p. 83), la self-induction est un effet analogue à l'inertie. Il est plus difficile de développer un brusque courant dans un circuit où la self-induction est considérable (comme dans un circuit formé, par exemple, d'un grand nombre de tours de fil enroulés très près les uns des autres, de manière à exercer une action inductrice considérable les uns sur les autres, spécialement s'ils enveloppent un noyau de fer) que dans un circuit où il y a peu de self-induction. Nous ne pouvons développer davantage ici la loi magnétique qui régit l'action de la self-induction sur les variations momentanées de la force électromotrice; mais son application à la dynamo montée en dérivation est trop importante pour être passée sous silence.

Dans le cas qui nous occupe, la partie dérivée du circuit se compose d'un grand nombre de tours de fil fin enroulés sur des noyaux de fer. Elle a par suite un coefficient de self-induction beaucoup plus élevé que le reste du circuit; en conséquence, toute variation brusque dans la vitesse ne peut qu'affecter le courant dans le circuit principal plus que dans la dérivation. Bref, le montage d'une machine en dérivation, s'il donne au courant de la fixité contre des perturbations dues à des variations de résistance dans le circuit, ne la rend pas plus fixe à l'égard des perturbations dues à des varia-

tuée d'un grand nombre de tours de fil fin ou d'un petit nombre de tours de gros fil, si le volume occupé par la bobine est le même dans les deux cas.

tions dans la vitesse d'entraînement. C'est l'inverse qui a lieu dans la machine montée en série.

Ces divers systèmes peuvent être appliqués aussi bien aux machines à courant direct qu'à celles à courants alternatifs. Chacun de ces quatre modes d'excitation du champ magnétique a ses avantages particuliers pour des cas spéciaux, mais aucun d'eux n'est parfait. Parmi ces méthodes, pas une seule n'assure, pour une vitesse uniforme de rotation, la constance soit de la différence de potentiel, soit de l'intensité du courant, quelles que soient les variations de résistance du circuit.

Mais, si la théorie nous dit qu'aucun de ces systèmes n'est parfait, elle ne nous laisse cependant pas sans guide. Grâce à MM. Marcel Deprez, Siemens, le professeur Perry, Paget Higgs, Bosanquet, Crompton et Kapp, Schuckert et autres, nous savons aujourd'hui combiner ces méthodes de manière à obtenir pratiquement d'une machine marchant à une vitesse constante soit une différence de potentiel, soit une intensité de courant constante. Ces méthodes sont soigneusement étudiées et développées aux chapitres de la théorie algébrique. Nous n'en donnons ici qu'une description pour compléter l'énumération des organes des machines dynamos.

Méthodes de Combinaisons.

La découverte du principe sur lequel repose la méthode appliquée à la construction des machines auto-régulatrices est due à M. Marcel Deprez; elle est le résultat d'études sur les diagrammes des caractéristiques des machines dynamos¹. Deux cas distincts

1. Voir *La Lumière électrique*, 3 décembre 1881 et 5 janvier 1884. — Nous ne devons pas omettre de faire ressortir, comme l'a fait l'auteur dans ses conférences (Cantor Lectures) sur le même sujet, tout ce que les travaux récents de M. Deprez ont emprunté aux recherches antérieures des D^{rs} J. Hopkinson et O. Frölich relativement aux caractéristiques des machines dynamo-électriques. Dans son étude d'avril 1879, le D^r Hopkinson fait observer que ces courbes fournissent de précieux renseignements; il dit « qu'une courbe de ce genre détermine l'importance du courant qui s'écoule, à une vitesse de rotation donnée quelconque de la machine et dans des conditions quelconques de circuit, soit comme résistance, soit comme force contre-électromotrice, et qu'elle fournit également des données très approchées sur la courbe similaire afférente à d'autres machines du même type, mais dans lesquelles les nombres de tours de fil sur les électro-aimants ou sur l'induit sont différents ». (*Comptes rendus de l'Institut*

exigent l'application de cette méthode. Comme, dans les applications industrielles, le premier rôle d'une dynamo est d'alimenter suffisamment et régulièrement un système de lampes, et que, dans la pratique, les lampes sont toujours¹ disposées soit en série, soit en circuits parallèles (c'est-à-dire en dérivation), il est évident qu'on a besoin, dans le premier cas, d'un courant constant, et, dans le second, d'une différence de potentiel constante.

Nous avons fait remarquer précédemment qu'une dynamo en série était mieux appropriée à une distribution « en dérivation », et une dynamo en dérivation à une distribution « en série ». Si l'armature de la dynamo en série était dépourvue de toute résistance, le courant fourni par elle au système de lampes quand la vitesse est constante serait inversement proportionnel à la résistance du circuit extérieur; en d'autres termes, on aurait, pour une vitesse constante, une différence de potentiel aux bornes absolument constante². D'autre part, si une machine *shunt* ou en dérivation était construite avec une armature de résistance considérable, la force électromotrice qu'elle développerait à une vitesse constante serait très sensiblement proportionnelle à la résistance extérieure, car, en doublant la résistance extérieure, on doublerait très approximativement la proportion du courant passant dans le shunt, et dès lors (en admettant toujours que les noyaux de fer soient éloignés de leur point de saturation) le magnétisme des électro-aimants serait doublé; en d'autres termes, on obtiendrait une intensité de courant approximativement constante³. Or il est impossible, nous le savons,

des Ingénieurs-mécaniciens, Londres, 1879, p. 247). Ce travail, ainsi qu'un autre du Dr Hopkinson, de 1880, et celui du Dr Frölich renferment un grand nombre de déductions publiées depuis comme dues à M. Marcel Deprez. Mais ces travaux ne touchent pas directement à notre sujet, bien qu'un grand nombre des points qu'ils mettent en relief soient d'un extrême intérêt. (*N. du T.*)

1. Je sais bien qu'on a parfois disposé des lampes à incandescence par deux ou trois en série; chacun de ces groupes étant monté en dérivation, c'est le montage en séries multiples parallèles, mais je n'ai pas connaissance qu'un montage de ce genre ait donné des résultats satisfaisants.

L'auteur paraît ici mal renseigné; plusieurs dispositions de ce genre, et notamment celle adoptée au Savoy-Theatre, à Londres, où la plupart des lampes sont montées deux par deux en série, fonctionnent avec un plein succès. (*N. du T.*)

2. La machine Weston, mentionnée p. 156, satisfait à cette condition plus approximativement que toute autre dynamo. (Il en est de même de certaines machines Siemens à très faible résistance.)

3. Il est curieux que cette aptitude essentielle et respective des deux types de ma-

d'avoir une armature sans résistance. Mais si, connaissant la résistance de l'armature de notre dynamo en série, nous arrivons à trouver quelle est l'aimantation additionnelle nécessaire à l'augmentation de la force électromotrice de fonctionnement de la machine, de telle sorte que la force électromotrice nette (déduction faite de la portion employée à vaincre la résistance intérieure) soit constante, et que, après l'avoir trouvée, nous empruntons cette aimantation à une source extérieure constante quelconque, notre dynamo en série ainsi renforcée agira comme si elle n'avait pas de résistance interne et donnera une différence de potentiel constante à ses bornes. Dans l'autre cas, une résistance interne élevée de l'armature ne serait pas économique; mais si nous déterminons la résistance interne de la dynamo en dérivation, et que nous fassions un calcul analogue relativement à la quantité de force électromotrice additionnelle nécessaire à la production d'un courant toujours suffisant pour le circuit dérivé en plus du courant qui passe dans le circuit extérieur; si d'ailleurs nous empruntons à une source étrangère constante cette force électromotrice additionnelle, soit directement, soit en ajoutant à l'aimantation, alors la dynamo en dérivation ainsi aidée fournira un courant d'intensité constante dans le circuit extérieur, quelque variable que puisse être la résistance de ce circuit.

Pour une distribution *sous potentiel constant*, nous devons avoir, en conséquence, des combinaisons de dynamo *en série* avec excitation auxiliaire.

Pour une distribution *à intensité constante*, il nous faut avoir des combinaisons de dynamo *en dérivation* avec excitation auxiliaire.

chines en question aux deux cas qui nous occupent soit si peu reconnue. Edison, qui a besoin d'une différence de potentiel constante pour ses lampes toujours montées en dérivation, emploie cependant des machines montées elles-mêmes en dérivation. Les lampes Brush au contraire sont toujours montées en série et demandent un courant constant; aucune des machines Brush n'est cependant montée en dérivation et la dépense en fil fin pour l'enroulement des bobines en dérivation serait probablement un obstacle à ce genre de montage : il faudrait en effet près de 1600 mètres de fil par lampe alimentée! Au moment même où j'écris, dans le numéro courant de l'*Électricien* (mai, 1884), je trouve un article de M. F. Uppenborn décrivant une dynamo en série qui fonctionne à courant constant, et une dynamo en dérivation qui fonctionne avec une différence de potentiel constante!

Combinaisons pour Différence de potentiel constante.

1). *Excitation en série et par circuit séparé.* (Deprez.) — Cette combinaison, représentée figure 68, peut être appliquée à toute machine dynamo ordinaire; il suffit que les bobines des électro-

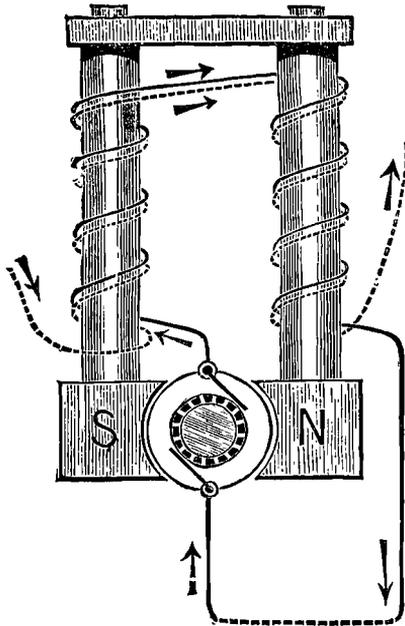


FIG. 68. — Excitation en série et par circuit séparé.

aimants soient disposées de telle sorte qu'un courant séparé provenant d'une source indépendante puisse en traverser une partie, de manière à produire un champ magnétique initial indépendant du courant fourni par la dynamo dans le circuit principal. Quand la machine fonctionne, la force électromotrice qui produit le courant dépend à la fois de cette excitation indépendante et de l'action excitatrice de son propre courant sur les électro-aimants. Si la machine tourne à une vitesse telle que le quotient de la portion de la force électromotrice due à l'auto-excitation, divisée par l'intensité du courant, soit numériquement égal à la résistance intérieure de la machine, la force électromotrice dans le circuit sera

constante, quelles que soient les variations des résistances extérieures. M. Deprez a démontré depuis que cette vitesse peut être déduite de l'expérience, et que, une fois la vitesse critique déterminée, la machine peut être réglée de manière à fonctionner avec une force électromotrice quelconque; il suffit, à cet effet, de faire varier l'intensité du courant d'excitation séparé dans la proportion voulue.

2). *Excitation en série avec adjonction de machine magnéto-électrique.* (Perry.) — La force électromotrice initiale dans le circuit,

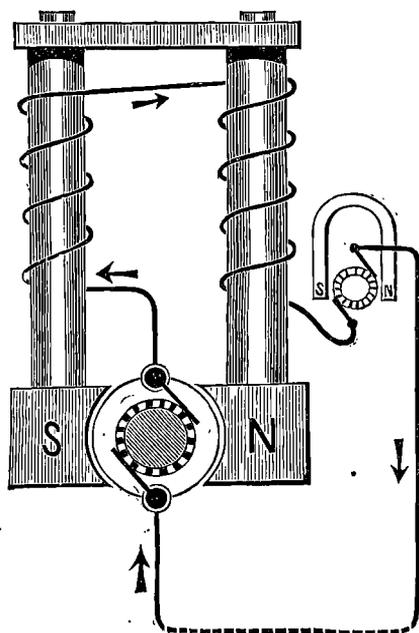


FIG. 69. — Excitation en série avec addition de machine magnéto-électrique.

exigée par la théorie de M. Deprez, n'a pas nécessairement besoin d'être produite par un champ magnétique initial d'origine indépendante. L'addition d'un aimant permanent pour donner aux pièces polaires des électro-aimants une aimantation partielle initiale résout sans doute le problème dans une certaine mesure; mais le professeur Perry a adopté la solution plus générale d'introduire dans le

circuit d'une dynamo en série une machine magnéto séparée, tournant elle-même à une vitesse uniforme telle qu'elle produise dans le circuit une force électromotrice constante égale à celle qu'on veut obtenir entre les conducteurs principaux d'aller et de retour¹.

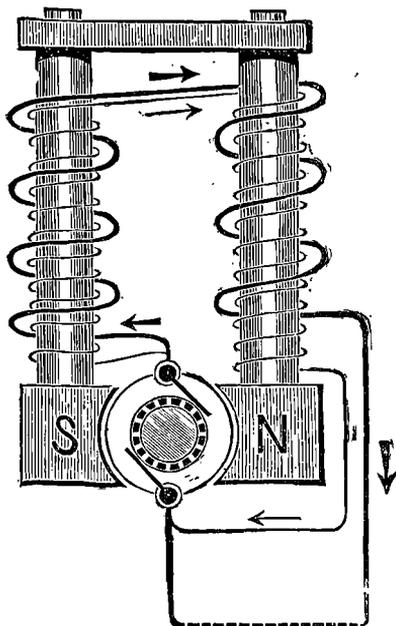
Cette disposition, indiquée dans la figure 69², peut être modifiée par l'emploi d'une machine dynamo montée en dérivation, dont les électro-aimants seraient intercalés, comme précédemment, dans la portion du circuit extérieure aux machines. La combinaison d'un aimant permanent avec des électro-aimants dans une seule et

1. M. le professeur Perry donne, dans l'exposé de ce système, l'application numérique suivante, à laquelle on ne peut faire d'autre objection que d'être fort peu économique, en raison de l'énorme résistance de 3 ohms supposée à la machine. « Admettons, dit-il, qu'il n'y ait qu'une seule machine dynamo, et que la résistance du conducteur principal, du fil de retour et des machines, c'est-à-dire, en réalité, la résistance de la portion du circuit total supposée constante, soit de 3 ohms, par exemple; on trouve que la machine dynamo doit tourner à une vitesse telle que la force électromotrice, en volts, produite dans ses parties mobiles, soit trois fois égale au courant, en ampères, qui circule dans les électro-aimants; cette vitesse peut, en conséquence, se déterminer aisément par l'expérience. Supposons que la force électromotrice constante de la machine magnéto soit de 50 volts, sa résistance de 0,3 ohm, et que la résistance de la machine dynamo et des autres parties invariables du circuit soit de 2,7 ohms, et prenons pour vitesse celle à laquelle correspond, pour la dynamo, une force électromotrice trois fois égale au courant. Admettons maintenant que les appareils de consommation aient une résistance de 2 ohms; la résistance totale sera de 5 ohms. La force électromotrice produite dans la dynamo sera évidemment de 75 volts (car si l'on désigne par x cette force électromotrice, l'intensité du courant sera $\frac{x}{3}$, d'où il suit que $\frac{x+50}{5} = \frac{x}{3}$, ou $3x + 150 = 5x$, ou $x = 75$), et la force électromotrice totale dans le circuit sera, par suite, de 125 volts; dès lors, la résistance totale étant de 5 ohms; l'intensité du courant sera de 25 ampères, ce qui donne une force électromotrice de 50 volts entre les extrémités de la portion du circuit renfermant les appareils de consommation. Si maintenant la résistance de consommation s'élève à 12 ohms, par exemple, plusieurs appareils venant à être mis hors du circuit, il se produit instantanément, dans la force électromotrice dont la dynamo est le siège, une modification qui la réduit à 12 1/2 volts, soit 62 1/2 volts pour le circuit tout entier, et 62 1/2 divisé par 15 donne 4 1/6 ampères; ce qui correspond à 4 1/6 multiplié par 12, ou 50 volts, comme précédemment, entre les extrémités de la portion utilisée du circuit. » (Le calcul donne en effet ici : $\frac{x+50}{15} = \frac{x}{3}$, d'où $3x + 150 = 15x$, ou $12x = 150$, c'est-à-dire $x = 12\frac{1}{2}$.)

2. MM. les professeurs Ayrton et Perry ont fait certaines réserves basées sur ce que la machine magnéto est représentée à une échelle relativement trop petite. Nous n'avons jamais eu la prétention de donner les proportions dans la figure, mais bien d'indiquer que la disposition en question s'appliquait à une dynamo *en série* avec une excitation indépendante auxiliaire. Il en est de même de la figure 73. Nous renvoyons d'ailleurs le lecteur à la communication faite par M. le professeur Ayrton à l'Institut de Londres, 23 février 1883, dont on trouvera un extrait dans *The Electrician* du 10 mars 1883.

même machine est bien antérieure aux idées émises par MM. Deprez ou Perry; elle a été décrite par Hjörth en 1854.

3). *Excitation en série et en dérivation.* (*Brush?*) — L'excitation des électro-aimants d'une dynamo, en partie par le courant principal et en partie par un courant pris en dérivation sur les balais de la



g. 70. — Excitation en série et en dérivation.

machine, comme l'indique la figure 70, n'est pas nouvelle; elle a été employée, il y a déjà quelques années, dans les machines Brush¹. Cette disposition n'est pas aussi parfaite que les précédentes; son action est plus limitée. Si les spires en dérivation sont relativement peu nombreuses et ont une résistance élevée, de telle sorte que leur puissance d'aimantation soit faible, la machine donnera approxima-

1. La dérivation du circuit principal dans les électro-aimants a été tout d'abord adoptée dans les machines électro-chimiques, pour prévenir le renversement du courant résultant du changement de polarité des électro-aimants; mais elle a été conservée dans d'autres types de machines en raison des avantages qu'elle présente au point de vue de la « fixité » du courant. MM. Siemens emploient également depuis longtemps cette combinaison.

tivement une différence de potentiel uniforme; tandis que, si la dérivation a une puissance d'aimantation relativement considérable, comparativement aux spires peu nombreuses du circuit principal, la machine sera mieux adaptée à la production d'un courant constant. Mais, comme précédemment, chaque cas exigera une certaine vitesse critique dépendant des dispositions de la machine.

4). *Excitation en série et en longue dérivation.* — En 1882, j'ai proposé de donner ce nom à une combinaison tout à fait analogue

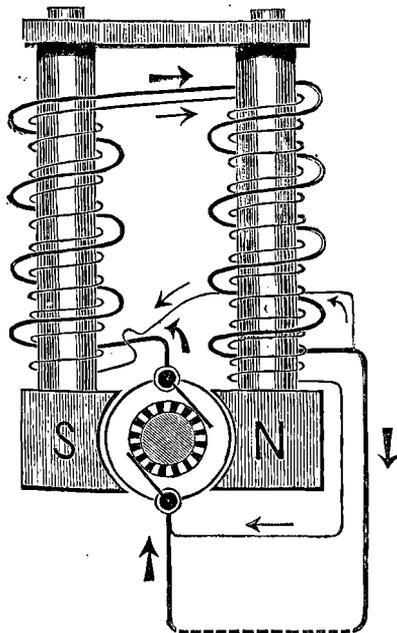


FIG. 71. — Excitation en série et en longue dérivation.

à la précédente, et qui n'avait pas encore, que je sache, été pratiquement essayée pour une application de ce genre. Si, comme dans la figure 71, les électro-aimants sont excités partiellement en série, mais partiellement aussi par des spires de fil plus fin, prises en dérivation sur la *totalité du circuit extérieur*, cette combinaison s'appliquera mieux que la précédente au maintien d'une différence de potentiel constante, car une variation quelconque dans la résistance du circuit extérieur produira sur la « longue dérivation » un

effet plus grand que ne le ferait l'introduction de la résistance des électro-aimants dans la portion du circuit principal extérieure à la dérivation.

En 1882 j'émettais l'opinion que si ces deux dernières combinaisons ne résolvait pas le problème avec autant de perfection que les précédentes, elles se prêtaient mieux à une appropriation immédiate¹, en ce sens qu'elles peuvent être appliquées sur une machine ordinaire quelconque et qu'elles n'exigent pas, comme les deux précédentes, l'emploi d'excitatrices séparées ou de machines magnétos indépendantes. Cette opinion a été pleinement justifiée par les progrès considérables réalisés depuis dans les machines « compound » ou « auto-régulatrices ».

Combinaisons pour Courant constant.

1). *Excitation en dérivation et par circuit séparé.* (Deprez.) —

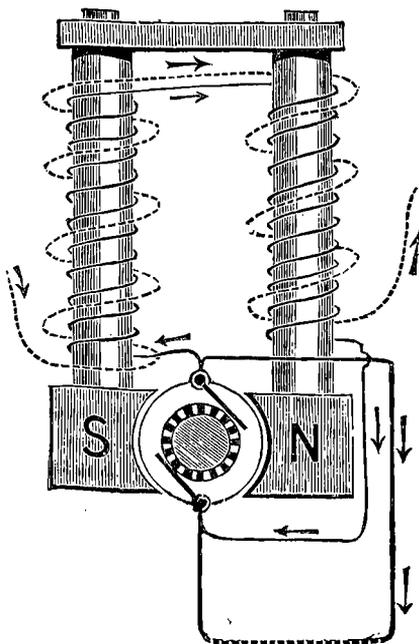


FIG. 72. — Excitation en dérivation et par circuit séparé.

Quand on doit, comme dans le cas d'un montage de lampes à arc en

1. La priorité d'invention du double enroulement *en série et en dérivation* est reven-

série, maintenir le courant dans le circuit principal à une intensité constante, la disposition de la figure 68 doit subir la modification indiquée par la figure 72; c'est une combinaison d'enroulement des électro-aimants en dérivation avec un autre enroulement recevant un courant d'excitation séparé. Cette disposition est, en réalité, celle d'une dynamo en dérivation avec champ magnétique initial indépendant de l'intensité du courant dans le circuit.

On voit que l'excitation séparée des électro-aimants n'a d'autre but que d'assurer un champ magnétique initial indépendant; dans ces conditions, il est évident qu'on peut arriver au même résultat par d'autres moyens.

2). *Excitation avec adjonction de machine magnéto en dérivation.* (Perry.) — La disposition de M. le professeur Perry pour la production d'un courant d'intensité constante est indiquée par le diagramme (fig. 73). Elle consiste dans la combinaison d'une dynamo en dérivation avec une machine magnéto de force électromotrice indépendante, cette machine magnéto étant insérée soit sur l'armature, soit sur les électro-aimants dérivés de la machine dynamo. Comme précédemment, l'expérience et le calcul doivent, suivant M. le professeur Perry, fournir la vitesse critique de fonctionnement. Dans les chapitres relatifs à la théorie algébrique, nous donnons, comme déduction des équations, une méthode pratique pour la détermination de l'enroulement à adopter pour les électro-aimants une fois la vitesse fixée.

diquée par plusieurs rivaux, M. Brush est sans contredit le premier à l'avoir employé; mais en connaissait-il réellement les avantages? Il est permis d'en douter d'après l'application qu'il en a faite. — Il est cependant mentionné comme tel par M. Alexandre Siemens dans le *Journal of Society of Telegraphist Engineers* d'avril 1880. Il est également revendiqué par M. Paget Higgs (*Electrical Review*, t. XI, p. 280, et *The Electrician*, du 23 décembre 1882); par J. W. Swan, d'après M. Bosanquet (*Ib.*, 9 décembre 1882); par M. J. Swinburne (*Ib.*, 23 décembre 1882); par M. S. Schuckert (*Ib.*, 13 octobre 1883); et a été breveté par MM. Crompton et Kapp (*Ib.*, 9 juin 1883). Voir aussi M. Hospitalier (*l'Électricien*, n° 20, 1882). Le lecteur peut également consulter une série d'articles dans *The Electrician*, t. X, commençant au n° du 16 décembre 1882 et dus à M. Gisbert Kapp. (S. P. T.)

Si nous sommes bien renseignés, l'idée première du double enroulement, indiqué par Sinsteden en 1871, remonterait pratiquement à M. Lauckert, attaché à la maison Siemens et à qui M. Paget Higgs, alors attaché à la même maison, l'aurait empruntée. (N. du T.)

3). *Excitation en dérivation et en série.* — Il y a, comme nous l'avons dit précédemment, un grand nombre de revendications relativement à la découverte de l'emploi du double enroulement « *compound* » en vue d'obtenir une différence de potentiel constante, mais l'emploi de l'enroulement « *compound* » destiné à la production d'un courant constant a été pour la première fois décrit

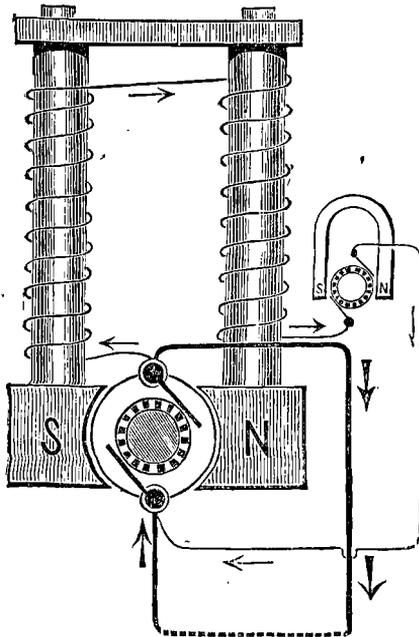


Fig. 73. — Excitation en dérivation avec adjonction de machine magnéto-électrique.

par l'auteur de cet ouvrage dans ses conférences (Cantor Lectures) du mois de décembre 1882; nous l'avons reproduit dans un des paragraphes ci-dessus où il est établi que, pour cette application, la partie essentielle de l'aimantation est celle fournie par les bobines en dérivation. La théorie de cet enroulement est donnée pour la première fois dans cet ouvrage (pages 271 à 273), et la méthode pratique de détermination du nombre de spires et de la section du fil, à la page 273.

Disposition du Double enroulement (compound).

L'enroulement compensé (*compound*) peut recevoir différentes dispositions. Quand on le fait sur la même carcasse d'électro-aimant, les spires en dérivation sont quelquefois enroulées extérieurement aux spires en série; il est plus rare que les spires en série soient extérieures à celles en dérivation. Dans quelques machines Siemens les deux enroulements sont faits sur des carcasses introduites l'une à côté de l'autre sur les mêmes noyaux d'électro-aimants. Dans d'autres cas où (comme dans les types Siemens ordinaires) le pôle est situé au milieu du noyau magnétique, l'une des extrémités des noyaux peut porter les bobines en dérivation, et l'autre, celles en série; ou bien encore les deux bobines placées sur l'un des noyaux peuvent être les bobines en série, et les deux placées sur l'autre, les bobines en dérivation; en d'autres termes les deux sortes de bobines peuvent être disposées en diagonales, ou dans le prolongement l'une de l'autre respectivement. M. P. Higgs recommande énergiquement l'enroulement des deux jeux de bobines sur des carcasses séparées aboutissant à une pièce polaire commune. Au total, la symétrie est préférable. Pratiquement, on paraît enclin à enrouler les spires en dérivation extérieurement aux spires en série.

Autres modes de Régulation automatique.

Toutes les dispositions énumérées dans ces dernières pages présupposent une vitesse de rotation constante, mais elles ne sont pas les seules à exiger cette condition. On peut monter une machine dynamo en série de manière à lui faire fournir un courant constant en intercalant sur les électro-aimants une dérivation de résistance variable, cette résistance étant réglée elle-même automatiquement par un électro-aimant dont les bobines font partie du circuit. Cette disposition est déjà appliquée au régulateur automatique dont sont munies les machines Brush pour l'alimentation d'une série de foyers à arc. La résistance variable est dans ce cas une colonne de plaques de charbon de cornue. Quand elles sont

pressées l'une contre l'autre, elles conduisent bien; mais quand la pression diminue, leur contact imparfait rompt partiellement le courant et en réduit l'intensité. Un réglage analogue peut être aussi employé dans les machines en dérivation pour obtenir le maintien d'une différence de potentiel constante; une résistance variable est, dans ce cas, introduite dans le circuit des électro-aimants dérivés; quelques machines dynamos Edison en fournissent un exemple. Cette disposition exige, pour être parfaite, que la résistance variable soit réglée automatiquement par un électro-aimant dont les bobines soient une dérivation indépendante prise sur le conducteur principal du circuit extérieur. Il existe encore un autre moyen d'effectuer pratiquement le réglage des dynamos, et ce, sans qu'il soit besoin d'une vitesse de rotation constante.

Supposons qu'on supprime le régulateur ordinaire à force centrifuge de la machine à vapeur, et que l'admission de la vapeur soit réglée, non pas d'après la vitesse de rotation, mais au moyen d'un régulateur électrique, tel que le régulateur de Richardson formé d'un solénoïde qui entoure un noyau mobile agissant en opposition avec un ressort ou un poids. Si ce régulateur électro-magnétique a pour objet de maintenir une différence de potentiel constante, ses bobines doivent être prises en dérivation sur le circuit principal; s'il s'agit, au contraire, de maintenir le courant constant, ses bobines doivent faire partie du circuit principal. Un régulateur de ce genre est plus efficace et plus rapide qu'aucun régulateur à force centrifuge destiné à assurer l'uniformité de la vitesse de rotation. Voici les résultats obtenus dans une expérience faite à Lincoln en présence de l'auteur, sur une machine Brush de 16 foyers munie d'un régulateur Richardson : — Dix-sept lampes étant allumées, on en éteignit six tout d'un coup; en quatre secondes la vitesse de la machine tomba de 138 à 107 tours et le courant fut ramené à son intensité précédente. Les dix-sept lampes étant de nouveau allumées, on les retira toutes du circuit en laissant passer le courant uniquement dans le circuit exciteur de la dynamo. En quatorze secondes la vitesse de rotation tomba à vingt-quatre tours, la machine à vapeur se traînant péniblement à la vitesse juste suffisante pour maintenir les électro-aimants en charge. Dans une autre expérience on rompit brusquement le circuit

des dix-sept lampes marchant à la fois, la machine à vapeur faisant 140 tours. Au bout de cinquante-cinq secondes elle était arrêtée, l'admission de la vapeur ayant cessé en moins d'un quart de seconde. Aucun régulateur à force centrifuge n'aurait intercepté la vapeur d'une façon aussi instantanée ; il n'aurait pas agi tant que la machine à vapeur n'aurait pas commencé à s'emporter. Avec le régulateur électrique l'admission était supprimée avant même que la machine eût le temps de s'emporter.

A propos des dynamos à enroulement *compound* ou auto-régulatrices, il est à remarquer que, plus elles sont réellement auto-régulatrices, plus elles sont sensibles au moindre changement de vitesse. Il faut toujours user avec elles d'un artifice quelconque analogue au régulateur électrique, sans quoi elles ne peuvent être maintenues à la vitesse uniforme absolument nécessaire à leur bonne marche. Le grand avantage du régulateur électrique est qu'il interrompt la consommation de la vapeur exactement suivant les besoins du circuit électrique et empêche ainsi les accidents tant à la dynamo qu'à la machine à vapeur.

Il est dans le fonctionnement des machines dynamos un autre point trop important pour être passé sous silence. Les ingénieurs savent tous que la force mécanique transmise par un arbre est mesurée par le produit de deux facteurs, sa vitesse et le moment du couple auquel il est soumis ; ou, comme on dit souvent aujourd'hui, la vitesse et le couple de torsion. Si l'on désigne par ω la vitesse angulaire et par \mathcal{C} le couple de torsion (ou moment de rotation), on a

$$\omega \mathcal{C} = \text{travail mécanique par seconde ou « activité ».}$$

Mais l'*activité*, le travail par seconde ou la puissance d'une machine dynamo peut se mesurer électriquement par le produit de sa force électromotrice et de l'intensité du courant qu'elle détermine dans le circuit. Si nous désignons par E la force électromotrice, et par i l'intensité du courant, nous aurons

$$Ei = \text{travail électrique par seconde.}$$

Dans une bonne machine dynamo le travail électrique, tout en

étant inférieur au travail mécanique, dépasse 90 p. 100 de ce dernier. Or nous savons que, toutes choses égales d'ailleurs, la force électromotrice E d'une dynamo en série ou d'une machine magnéto est proportionnelle à sa vitesse angulaire ou d'entraînement. Il en résulte immédiatement que *le couple de torsion est proportionnel au courant i* . On en déduit dès lors cette conséquence qu'une dynamo en série peut fonctionner de manière à fournir un courant constant à la condition d'être actionnée par un moteur à vapeur régi *non par un régulateur à force centrifuge destiné à maintenir la vitesse constante, mais par un régulateur dynamométrique approprié au maintien d'un couple de torsion ou moment de rotation constant*. Un bon dynamomètre de transmission quelconque tel que celui de Morin, celui d'Hefner Alteneck, ou l'une des dernières variétés, comme ceux imaginés par MM. Ayrton et Perry, ou mieux encore celui du Rev. F. J. Smith¹, et dont on trouvera la description au Chapitre XXVI, peut être disposé de manière à actionner une valve d'équilibre et satisfaire pleinement à la condition ci-dessus.

Mais dans une machine à vapeur ordinaire le travail par seconde est également le produit de deux facteurs, la vitesse du piston et la pression de la vapeur ; et la vitesse angulaire de l'arbre est proportionnelle à la première, et le couple de torsion auquel il est soumis à la dernière. En conséquence une pression constante sur le piston satisfera à la condition du maintien d'une intensité de courant constante. Si les valves sont réglées de manière à admettre à chaque coup une quantité de vapeur déterminée et si la pression est bien réellement maintenue constante dans la chaudière, la pression moyenne derrière le piston devra être constante. Dans la pratique on n'arrive jamais à ce résultat en raison du frottement de la vapeur dans les tuyaux et les orifices des valves. Les frottements intérieurs dans la machine à vapeur jouent, en empêchant une auto-régulation absolue, le même rôle que la résistance électrique intérieure dans la machine dynamo. On ne peut arriver qu'à une approximation. Dans une expérience faite par M. Pollard avec une machine Gramme, le courant ne donnait au galvanomètre que des

1. Voir l'excellent petit livre récemment publié par MM. Spon et Cie, sur les *Appareils destinés à la mesure du travail*, et dû à la plume de cet auteur.

déviations variant de 59° à 54° , alors qu'on introduisait dans le circuit des résistances additionnelles qui faisaient passer la vitesse de 436 à 726 révolutions par minute. Théoriquement, rien n'est plus facile, comme on le voit, que de maintenir une intensité de courant constante avec une dynamo en série. Il suffit d'avoir une chaudière suffisante, de maintenir toujours au même point la pression de la vapeur, de supprimer tous les régulateurs et d'admettre à chaque coup de piston, quelle que soit la vitesse, des quantités égales de vapeur : *on devra* obtenir ainsi une intensité constante de courant. On ne peut arriver à résoudre d'une manière analogue le problème du maintien d'une différence de potentiel constante à moins d'employer une machine montée en dérivation. Avec une machine en dérivation, comme nous l'avons expliqué page 92, le courant sera constant si la vitesse est constante, pourvu que la résistance de l'armature soit considérable. C'est-à-dire que i est à peu près proportionnel à ω . Avec une dynamo en dérivation, E sera donc sensiblement proportionnel à \mathcal{C} , et par suite, si la condition d'entraînement est telle que \mathcal{C} soit constant, E sera aussi approximativement constant. Avec une chaudière suffisante, donnant une pression de vapeur constante, et des valves convenablement réglées, une machine en dérivation doit, sans aucun régulateur, donner une différence de potentiel à peu près constante, la vitesse variant proportionnellement au courant exigé par les lampes. Cette condition ne peut naturellement pas être absolument réalisée dans la pratique, une grande résistance de l'armature étant synonyme de mauvaise économie; certaines réactions intérieures dans la dynamo viennent d'ailleurs s'opposer à une parfaite corrélation de marche.

Mais il est possible de faire un pas de plus dans la réalisation de ce plan. La méthode actuellement employée pour maintenir constante la pression de la vapeur consiste à placer sur la chaudière un manomètre, indiquant au chauffeur quand il doit mettre du combustible ou quand il doit laisser tomber son feu. Il suffit de laisser de côté l'indicateur de pression et, en son lieu et place, de disposer à côté du foyer soit un ampère-mètre, si la machine dynamo doit fournir un courant constant, soit un volt-mètre, s'il s'agit d'obtenir une différence de potentiel constante;

le chauffeur réglera alors son feu selon les besoins du système électrique de distribution. Existe-t-il une raison plausible pour que ce mode d'opérer ne soit pas réalisable dans la pratique, au moins dans le cas d'une dynamo en série destinée à fournir une intensité constante ?

CHAPITRE VII

TYPES DE MACHINES

DYNAMOS DE LA CLASSE I

Armatures en Anneau.

Machine Pacinotti. — Cette machine, représentée par la figure 74, est décrite dans le journal italien *Il Nuovo Cimento* de 1864.

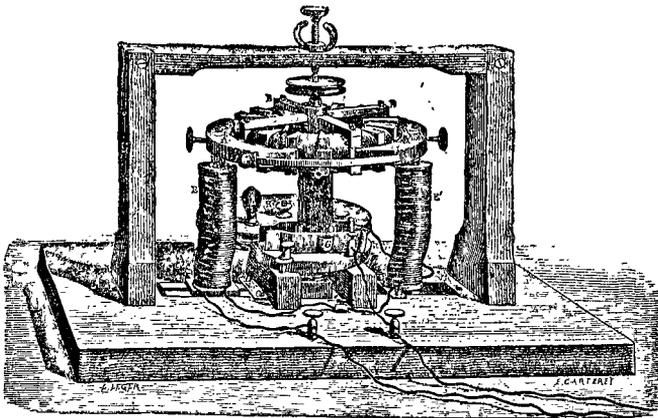


FIG. 74. — Machine de Pacinotti.

L'armature était formée d'un anneau de fer, représenté séparément dans la figure 75, muni de seize dents égales et supporté par quatre bras BB. Entre les dents étaient roulées seize bobines de neuf spires chacune, montées sur des carcasses de bois. Des extrémités de chaque section les fils aboutissaient au commutateur. Ce dernier était un cylindre de bois dans lequel étaient pratiquées seize rai-

nures contenant autant de bandes de laiton. Chacune de ces bandes de laiton était soudée à la fin d'une section et au commencement de la suivante. Deux brosses métalliques pressaient sur le commutateur en des points situés sur un diamètre à angles droits par rapport à la ligne joignant les pôles des électro-aimants verticaux qui étaient munis de larges pièces polaires. L'anneau était décrit par Pacinotti comme un « électro-aimant transversal », et, bien que la machine fût présentée sous le nom de moteur électrique, son fonctionnement comme génératrice était spécifié dans les termes les plus précis. « Il me semble », écrivait le professeur Pacinotti, « que ce qui donne encore plus de valeur à ce type de machine électro-magnétique, c'est la facilité avec laquelle il se prête à une transformation en *machine magnéto-électrique à courants continus*. Si, au lieu d'un électro-aimant, on avait un aimant permanent, et si l'électro-aimant transversal, c'est-à-dire l'anneau, était animé d'un mouvement circulaire, on le transformerait en machine magnéto-électrique, qui donnerait un courant induit continu dirigé toujours dans le même sens. » Le professeur Pacinotti a également excité les électro-aimants à l'aide d'une pile, et obtenu en faisant tourner l'anneau un courant continu dans son circuit. Il a de plus ajouté les remarques très caractéristiques suivantes sur la réversibilité de la machine. « Ce nouveau modèle montre d'ailleurs comment la machine électro-magnétique motrice est réciproque de la machine magnéto-électrique génératrice; dans la première, en effet, le courant électrique introduit par les rhéophores (les balais), en circulant dans les bobines, permet d'obtenir le mouvement de la poulie et d'utiliser son travail mécanique; et dans la seconde, l'application d'un travail mécanique à faire tourner la poulie donne, sous l'action de l'aimant permanent, un courant qui circule dans les bobines pour arriver aux rhéophores et passer de là à l'appareil sur lequel il doit agir. »

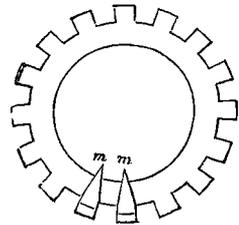


FIG. 75. — Anneau de Pacinotti.

En dépit de sa très haute valeur, ce modèle original resta oublié au milieu de la collection d'instruments de l'Université de Pise,

jusqu'au jour où son principe fondamental fut découvert une seconde fois et rendu pratique par d'autres.

Machine Gramme. — L'organe essentiel de la machine Gramme est son anneau. Il est ordinairement construit comme l'indique la figure 76. Une certaine quantité de fil de fer doux est enroulée sur une carcasse spéciale ou réunie en un faisceau annulaire qui lui sert d'âme. On voit en A ce noyau dénudé et coupé transversalement, ce qui permet d'en mieux comprendre la structure. Sur ce noyau sont roulées les sections séparées BB de fil de cuivre isolé.

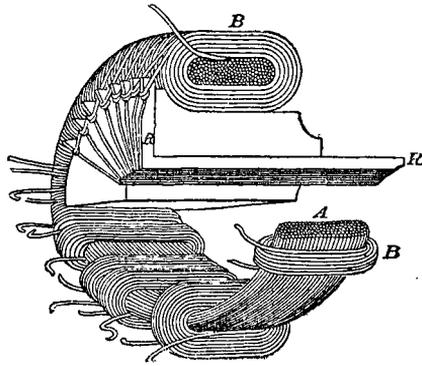


FIG. 76. — Anneau Gramme.

Chaque section est hobinée séparément à la main entre des joues mobiles, destinées à leur assurer exactement la largeur voulue et qu'on retire ensuite; le fil de chaque section est passé à l'intérieur et à l'extérieur de l'anneau à l'aide d'une navette. La fin de chaque bobine et le commencement de la suivante sont reliés l'un à l'autre et viennent aboutir à une pièce radiale isolée R qui constitue l'une des lames du collecteur. Quand toutes les sections sont revêtues de fil, on introduit un moyeu en bois dans l'espace resté libre entre les lames du collecteur et l'anneau ainsi formé est monté sur un arbre.

La spécification du brevet Gramme anglais (de 1870) porte que l'armature peut affecter la forme d'un anneau cylindrique plein ou creux, ou toute autre disposition convenable sans fin, et être constituée soit d'une seule pièce de fer, soit d'un faisceau de fils de fer,

la surface entière de ce noyau sans fin étant revêtue d'une série de bobines de fil convenablement isolé, soit en cuivre, soit en tout autre métal bon conducteur de l'électricité, montées de telle façon que ces bobines, sections ou torons de fil puissent être considérés comme formant une même série continue de petites bobines; chacune d'elles étant reliée à sa voisine de manière à constituer une seule et même grande bobine sans fin. Dans le mouvement de rota-

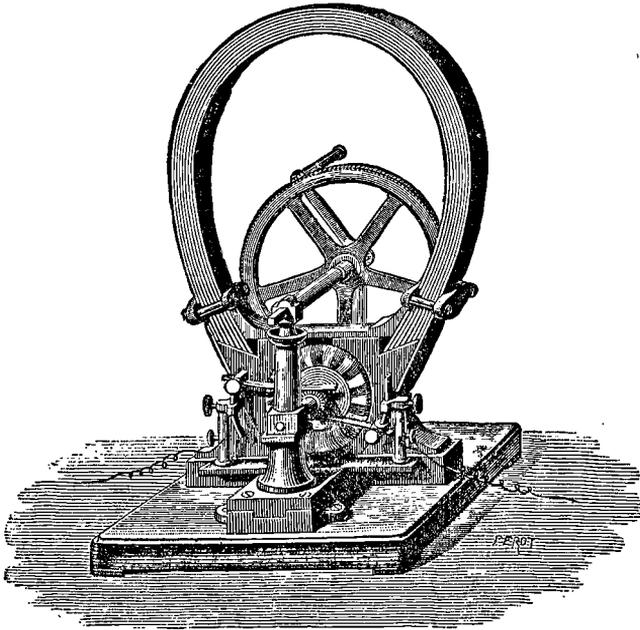


FIG. 77. — Machine Gramme, modèle de laboratoire.

tion qui lui est imprimé, l'anneau subit un déplacement continuél d'aimantation qui va toujours en avant. L'inventeur établit également que les bobines de fil peuvent être remplacées par des bobines formées de bandes ou rubans de laiton ou autre bon conducteur convenablement isolé.

La machine Gramme a reçu des formes innombrables à différentes dates depuis son apparition en 1869; ces formes varient depuis les petites machines de laboratoire à aimants permanents en acier, analogues à celle représentée dans la figure 77, jusqu'aux grandes machines absorbant de 30 à 40 chevaux. Ceux qui désire-

raient des renseignements plus détaillés sur les divers types de machines Gramme peuvent consulter le traité de A. Niaudet intitulé : *Machines électriques à courants continus, systèmes Gramme et congénères* (1881). La figure 78 représente le type « A » ordinaire, dit *d'atelier*, le plus fréquemment employé. Plusieurs améliorations de détail ont été introduites dans la machine Gramme, tant en France qu'en Angleterre et aux États-Unis. Aux États-Unis, la Société Fuller qui exploite les brevets Gramme a produit la machine repré-

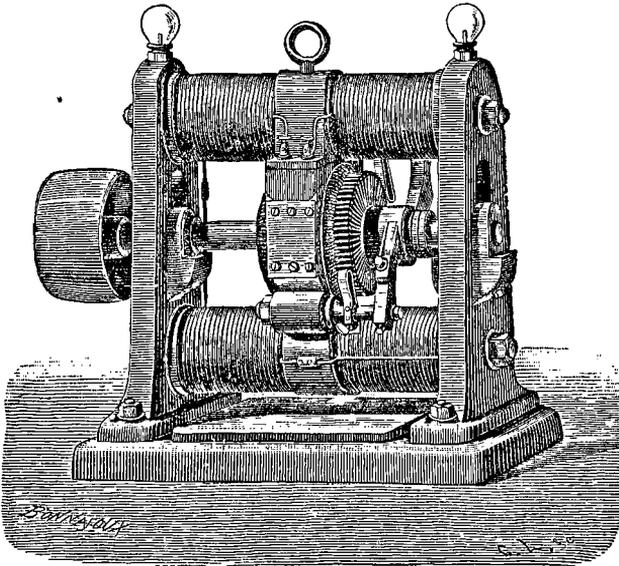


FIG. 78. — Machine Gramme, type A.

sentée par la figure 79 et d'autres modèles où l'on reconnaît une grande expérience de la construction mécanique. Les électro-aimants, les bâtis et les pièces polaires sont très massifs; l'anneau est mieux établi que dans les modèles d'Europe; il est en outre relié à l'arbre par un croisillon en bronze, au lieu d'être monté sur un moyeu de bois; enfin toute dislocation du collecteur est rendue impossible par suite de l'addition d'une frette isolée qui enveloppe ses extrémités.

MM. Emerson et Murgatroyd, qui ont construit des machines Gramme pour le marché anglais, ont récemment produit une machine montée en *compound* dont on fait un grand éloge. En France

également cette machine a subi d'importantes modifications entre les mains de M. Marcel Deprez. La machine Deprez a deux anneaux calés sur le même arbre, monté lui-même entre les pôles de deux électro-aimants opposés, chacun du type à deux branches dit en fer à cheval (voir fig. 34, p. 40). Ces électro-aimants sont disposés horizontalement, le pôle N. de l'un opposé au pôle S. de l'autre, et

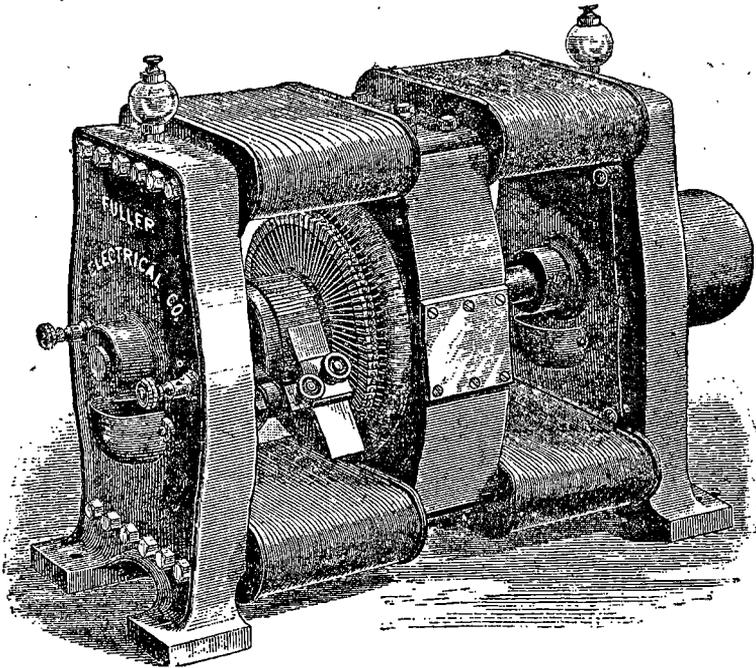


FIG. 79. — Machine Fuller-Gramme.

vice versa; les pôles sont munis de pièces polaires courbes entre lesquelles tournent les anneaux. Dans presque toutes les grandes machines Gramme du type ordinaire, les pièces polaires se trouvent au milieu de longs noyaux en fer, dont les bobines sont roulées de manière à donner un pôle conséquent en leur milieu. M. Deprez, qui s'est soigneusement attaché à concevoir une machine donnant, avec la moindre dépense d'énergie électrique, le plus grand couple possible sur l'arbre, prétend que la forme de fer à cheval est la plus avantageuse pour les électro-aimants. Les noyaux de fer et les culasses de ses électro-aimants sont très massifs; mais les pièces

polaires ne sont pas très lourdes. La machine Deprez comporte un système très compliqué d'enroulements sectionnés sur les électro-aimants et une table de connexions permettant de coupler ces sections à volonté. Les circuits des deux anneaux sont tout à fait distincts, et chaque armature a son collecteur et ses balais spéciaux. M. Deprez a également muni d'autres machines Gramme d'armatures en fil fin pour ses expériences de transport de force.

Machine Maxim. — Dans la machine Maxim, l'anneau est allongé dans le sens de l'axe, ce qui le transforme en un cylindre creux, à l'intérieur duquel on introduit le fil pour le ramener ensuite sur la surface extérieure. Les électro-aimants employés par l'inventeur sont de la forme générale adoptée dans le type vertical des machines Siemens. Cette machine est en outre munie d'un système automatique destiné à régler les conditions de son fonctionnement; à cet effet un petit moteur magnéto-électrique monté sur la machine fait glisser les balais en avant ou en arrière et modifie le calage de manière à corriger les variations de potentiel aux bornes.

Machine Hockhausen. — Dans cette dynamo, comme dans la précédente, l'anneau a une forme allongée; mais il est construit d'une façon particulière: les bobines préalablement roulées sont montées sur quatre bâtis en fer courbes séparés qui sont ensuite boulonnés ensemble et assujettis sur de solides plateaux extrêmes. Les électro-aimants de cette machine sont disposés de la façon la plus étrange: l'anneau est monté entre deux électro-aimants droits placés verticalement l'un par-dessus l'autre; l'électro-aimant supérieur est maintenu en place par deux pièces de fer latérales recourbées qui retombent des deux côtés de la machine et relient le sommet de l'électro-aimant supérieur avec la partie la plus basse de l'électro-aimant inférieur. Cette disposition, qui tire l'œil comme mauvaise tant au point de vue mécanique qu'au point de vue magnétique, est prônée comme une des qualités de la machine, qui, en dépit de ses inducteurs, fonctionne très bien, dit-on. Comme la machine Maxim, elle est pourvue d'un petit moteur destiné à régler le calage des balais et qu'on prétend automatique dans son action. Les segments du collecteur, qui sont très massifs, sont isolés par

l'air seul et boulonnés sur un fort disque d'ardoise. Je n'ai rien entendu dire du rendement de cette machine.

Machine Cabella. — La forme d'armature en anneau récemment imaginée par M. B. Cabella se recommande aux constructeurs-amateurs de dynamos en raison de la simplicité de sa construction. Les figures 80 et 81 montrent ses dispositions générales. L'armature ressemble à celle des machines chimiques Siemens et à celle d'Edison en ce qu'elle est formée de bandes de cuivre. Ces bandes sont découpées séparément et se composent chacune d'une pièce

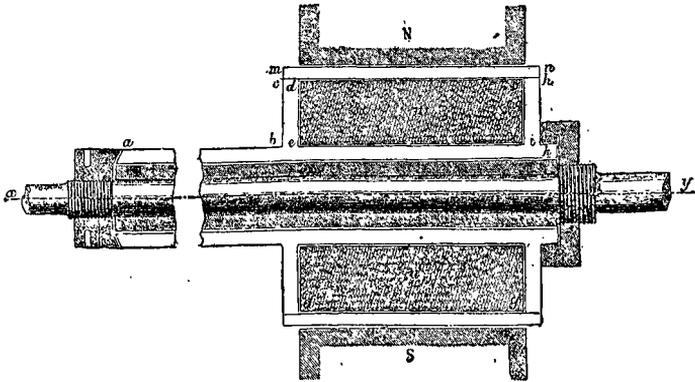


FIG. 80. — Armature Cabella (coupe longitudinale).

droite, *a,k*, d'où partent deux bras perpendiculaires, *d,e*, et *h,i*. L'arbre est recouvert d'un manchon isolant autour duquel viennent se loger, au nombre de 240 environ, ces pièces de cuivre dont les bras, *d,e*, et *h,i*, font saillie en deux jeux rayonnants, respectivement situés vers les deux extrémités. L'intervalle qui les sépare est garni de matière isolante, puis entièrement rempli de fil de fer doux enroulé circulairement. Des bandes de cuivre droites, *m,n*, de 8 millimètres de large et de 2 millimètres d'épaisseur, sont fixées extérieurement à l'aide de vis (comme les barres des armatures Siemens et Edison) sur les bras *d,e*, et *h,i*, reliant ainsi les extrémités d'un des jeux de rais à celles de l'autre et complétant le parallélogramme représenté dans la section. Pour relier tout l'ensemble de l'anneau en un circuit continu, ces bandes de cuivre extérieures sont connectées à leurs deux extrémités à des rais n'appartenant

pas à la même bande de cuivre intérieure, mais à des bandes adjacentes. Ainsi une barre extérieure relie l'extrémité antérieure de la première bande à l'extrémité postérieure de la seconde, et ainsi de suite. De trois en trois les bandes sont ramenées le long de l'axe et reliées à un segment du collecteur. Cette construction est certainement plus simple que celle d'Edison et pourrait être adaptée à un grand nombre de types divers de machines. D'après le

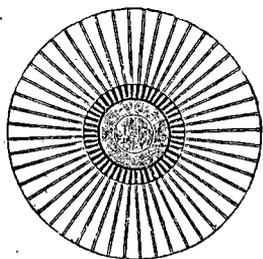


FIG. 81. — Armature Cabella
(vue de bout).

professeur Ferrini, une des armatures Cabella substituée entre les pôles d'une machine Edison de 60 lumières (type « Z » ancien modèle) à son armature ordinaire, augmenterait sa puissance jusqu'à lui permettre d'alimenter 150 lampes.

Machine Bürgin-Crompton. — Cette machine est caractérisée par son armature. Les électro-aimants, d'un type horizontal assez analogue à ceux des machines horizontales Siemens, sont en fonte. L'armature de la machine Bürgin originale, telle qu'elle a été importée de Suisse, était formée de plusieurs anneaux juxtaposés sur un même arbre, ces anneaux étant faits en fil de fer enroulé sur une carcasse carrée et portant chacun quatre bobines. C'est sous cette forme qu'elle est décrite dans les Conférences du professeur Adams (Cantor Lectures) sur l'éclairage électrique, de 1881. Mais entre les mains de MM. R. E. Crompton et C^{ie} elle a subi d'importantes modifications. M. Crompton a abandonné la forme carrée pour la forme hexagonale garnie alors de six bobines (fig. 82), et a porté à dix le nombre des anneaux. Voici comment a été décrite la machine en 1882 : « Chaque anneau est formé d'une carcasse hexagonale en fil de fer, montée sur de légers rais métalliques qui aboutissent aux angles de l'hexagone. Sur ce bâti hexagonal sont roulées 6 bobines de fil recouvert, renforcées au milieu des 6 pans de l'hexa-

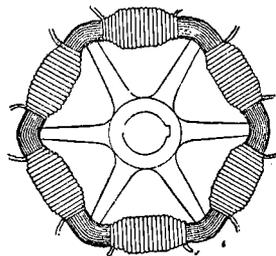


FIG. 82. — Anneau séparé d'une
armature Crompton-Bürgin.

gone, ce qui donne approximativement à chaque anneau la forme d'un cercle. Chacune des 6 bobines est séparée de sa voisine, et chacun des 10 anneaux est fixé à l'axe en avance d'un soixantième de circonférence sur son voisin, de telle sorte que les 60 bobines séparées sont en réalité équidistantes et, vues de bout, symétriquement disposées autour de l'axe. Le collecteur a 60 sections; chacune de ses lames est reliée à l'extrémité d'une bobine et au commencement de celle qui est en avance sur elle d'un soixantième, c'est-à-dire de celle qui lui correspond dans l'anneau voisin. Cette armature a le grand avantage, au point de vue pratique, d'être facile à construire, légère et largement ventilée. »

Sous cette forme cependant l'armature était soumise aux effets nuisibles de l'induction qui se produisait entre les anneaux voisins, aussi a-t-on cherché à y remédier en les alternant dans leur disposition respective au lieu de disposer leurs bobines élémentaires en hélices régulières sur l'arbre, comme l'indiquent la plupart des dessins de cette machine bien connue. Les études se sont ensuite portées sur l'augmentation de la quantité de fer dans les noyaux hexagonaux et sur la détermination expérimentale de la meilleure proportion de fer et de cuivre à adopter. En même temps, M. Crompton et M. Kapp y introduisaient leur mode d'enroulement « *compound* » des électro-aimants. Puis vint une autre modification de l'armature, consistant à faire les anneaux beaucoup plus larges et moins nombreux; quatre forts anneaux hexagonaux, reliés à un collecteur à 24 lames, remplacèrent alors les dix anneaux plus légers et leur collecteur à 60 sections.

Machine Crompton-Kapp. — Cette remarquable machine offre un exemple des résultats auxquels on peut arriver dans la voie des améliorations par une étude attentive des meilleures proportions à donner aux diverses parties d'une machine et par le choix des matériaux. La nouvelle dynamo pèse 1120 kilogr. environ. Ses électro-aimants à noyaux en fer de Suède forgé très doux sont roulés en *compound*. L'armature est formée d'un anneau unique du type allongé ou cylindrique, et ses bobines sont roulées sur une âme en fer formée de disques de fer doux très minces fixés sur un arbre central par l'intermédiaire de petits bras radiaux assemblés

en queue d'aronde dans des entailles pratiquées à la circonférence intérieure des disques. A certains intervalles un espace laissé libre entre les disques facilite la ventilation. Les bobines élémentaires, au nombre de quatre-vingt-seize dans quelques-unes de ces machines, et de cent vingt dans d'autres, se roulent par l'intérieur du cylindre comme dans l'anneau Maxim et sont maintenues en place

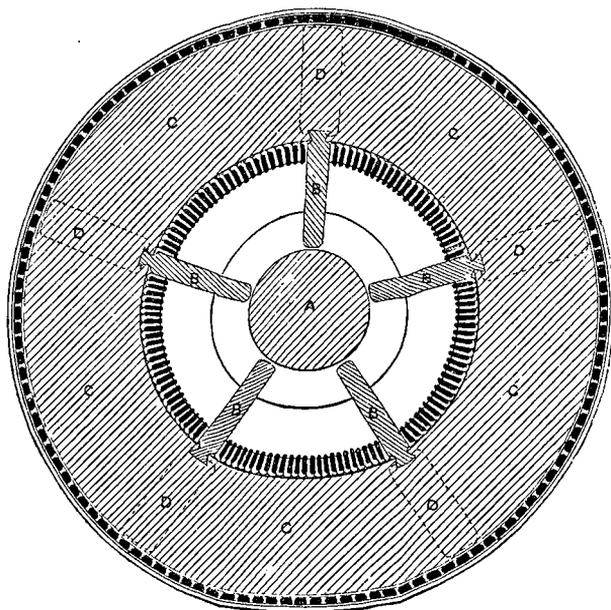


Fig. 83. — Section transversale de l'armature Crompton-Kapp.

par des coins en bois et une frette extérieure en fil de laiton fin (comme dans les machines Siemens).

La figure 83 donne une section transversale de l'armature telle qu'elle est faite dans les dernières machines. Cette armature a 70 centimètres de long sur 32 centimètres de diamètre extérieur. L'arbre en acier A porte cinq rainures ou gorges longitudinales destinées à recevoir cinq séries de rais B assemblés en queue d'aronde, ainsi que nous l'avons dit, dans les entailles correspondantes des disques de fer C. Tous les cinq centimètres environ, sur la longueur, sont insérées les pièces D qui ont 3 millimètres d'épaisseur et maintiennent les vides réservés pour la ventilation. A la

bobine il y a 120 spires ramenées de trois en trois à un segment d'un collecteur à 40 sections. Les spires sont formées de barres de cuivre étiré de section à peu près rectangulaire et de 30 millimètres carrés de surface environ. Les portions des spires qui passent à l'intérieur sont d'une forme plus allongée, ce qui permet de les loger aisément dans le cercle intérieur; elles sont relevées à leurs extrémités d'une façon analogue aux bandes de cuivre de l'armature Cabella. L'isolement est particulièrement soigné; il est formé de bandes de fibre vulcanisée découpées de manière à envelopper les conducteurs de cuivre à certains intervalles, tout en laissant libres les espaces vides pour la ventilation.

L'armature ne comportant qu'un petit nombre de spires, il était indispensable d'employer dans cette machine un champ magnétique d'une puissance extraordinaire. M. Crompton s'est appliqué à avoir un circuit magnétique aussi complet et d'aussi bonne qualité que possible. Il a cherché à augmenter l'intensité du champ magnétique par l'emploi d'une grande quantité de fer dans l'armature et par le rapprochement aussi voisin que possible de ce fer et des pièces polaires. Il est arrivé à augmenter ainsi la capacité de production (*out-put*) ou, selon l'expression de Sir William Thomson, « l'activité » (c'est-à-dire la quantité de travail par seconde) de la machine. Les premières machines de ce type n'avaient que 1 mètre de long, sur 0^m,30 de haut et 0^m,60 de large. Leur armature avait 0^m,43 de long sur 0^m,20 de diamètre. A 1000 révolutions par minute, elles donnaient 110 ampères à 145 volts, c'est-à-dire que leur « activité » était de 15950 watts; mais à cette vitesse elles s'échauffaient trop. La puissance des inducteurs est telle qu'à toutes les vitesses et quelles que soient les conditions du circuit extérieur, l'intensité du champ magnétique dépasse l'action magnétisante des courants dans les spires de l'armature. Il n'y a par suite presque pas d'inclinaison à donner au calage des balais, et le calage une fois déterminé est absolument constant. On ne voit pas d'étincelles aux balais, et en les regardant il est impossible de dire s'il y a ou non passage du courant. M. Crompton construit en ce moment une autre machine identique comme conception générale, mais plus grande, pour alimenter 1000 lampes Swan. Cette machine, y compris son moteur, n'a guère que 2^m,45 de long, sur 1^m,85

de haut et 0^m,70 de large; complète, avec sa plaqué de fondation; elle ne pèsera pas plus de huit tonnes. L'armature (fig. 83) est étudiée pour une machine donnant un courant de 200 ampères avec une différence de potentiel de 110 volts. MM. Crompton et Kapp trouvent que les machines à électro-aimants de fonte au lieu de fer forgé donnent, à la même vitesse et toutes choses égales d'ailleurs, une force électromotrice 40 fois inférieure à celles dont les noyaux sont en fer forgé.

Durant le cours de ses études de construction et d'amélioration des machines Bürgin-Crompton et d'autres d'un type plus récent, M. Gisbert Kapp a été conduit à employer une formule empirique pour le calcul pratique de la force électromotrice (totale) de dynamos du type à anneau allongé. Cette formule est la suivante :

$$E = \frac{\mu \cdot c \cdot t \cdot a^{\frac{2}{3}} \cdot b \cdot n}{10^6},$$

dans laquelle c est le nombre de segments du collecteur, t le nombre de tours de fil dans une des sections de l'anneau, a l'épaisseur du noyau de fer mesurée dans la direction radiale, b la longueur du noyau mesurée parallèlement à l'arbre, n le nombre de tours par minute, et μ le « module » de la machine. Quand a et b sont exprimés en *pouces anglais*, et E en volts, le module des machines du type Crompton-Bürgin a été trouvé varier de 35 pour des noyaux d'électro-aimants en fonte, à 42, pour des noyaux en fer forgé; les électro-aimants étant dans tous les cas excités aussi économiquement que possible pour le fonctionnement pratique de la machine. Le module μ représente en réalité la qualité du champ magnétique; et, d'après les observations de M. Kapp, il pourrait lui-même s'exprimer par la relation.

$$\mu = \frac{1}{\alpha} \operatorname{tang}^{-1} \beta P,$$

P représente le nombre d'ampères-tours ¹ dans le circuit exci-

1. Nous conservons l'expression anglaise (ampère-turns) très commode pour exprimer le produit $n i$ auquel on a constamment affaire dans la détermination de la puissance d'un électro-aimant de forme et de volume donnés.

tateur de l'une des branches des électro-aimants, α et β des constantes dépendant de la qualité, de la forme et de la quantité du fer. μ peut sans aucun doute être également et plus justement exprimé sous la forme donnée pour la quantité « H » dans la théorie algébrique au Chapitre XIII; il s'écrirait alors :

$$\mu = G \alpha P \frac{1}{1 + \sigma P};$$

G étant un coefficient géométrique dépendant uniquement de la grandeur et de la forme des électro-aimants, α le coefficient de perméabilité magnétique dépendant seulement de la qualité du fer, et σ un coefficient de saturation dépendant à la fois de la quantité et de la qualité du fer.

Dans l'expression de E donnée par M. Kapp, le produit des quatre quantités $c t a^{\frac{2}{3}} b$ peut être regardé comme constituant une valeur, pour ces machines, du coefficient d'armature « A » employé dans les équations du Chapitre X. Au début, M. Kapp, au lieu de $a^{\frac{2}{3}} b$, prenait simplement la surface de section transversale de l'âme de l'armature; mais, trouvant que dans les âmes formées de fil de fer (comme dans les armatures Gramme et Bürgin) les couches externes paraissaient soustraire les couches internes à l'influence magnétisante des électro-aimants, ou que tout au moins les couches internes étaient en apparence moins susceptibles de s'aimanter (probablement en raison de la discontinuité des couches dans la direction des lignes de force), il reconnut que la puissance $\frac{2}{3}$ de l'épaisseur de l'âme dans la direction radiale constituait une expression plus exacte des faits.

Machine Paterson et Cooper. — Dans la machine « Phénix » construite par MM. Paterson et Cooper nous rencontrons également une armature en anneau cylindrique modifiée; elle est formée d'un grand nombre d'anneaux dentés très minces en fer de Suède, séparés l'un de l'autre par du papier paraffiné et assujettis entre deux flasques à l'aide de trois boulons qui traversent les lames de tôle. Il n'y a pas d'espaces réservés dans l'armature pour la ventilation, ni de dents intérieures pour la séparation des bobines

élémentaires; on n'y voit pas non plus, comme dans la machine Lumley construite à une certaine époque par la même maison, de saillies intérieures destinées à conduire à l'arbre central la chaleur développée dans le noyau de fer. On constate en réalité relativement peu d'échauffement dans cette armature. Les pièces polaires des électro-aimants sont proportionnées de manière à donner au collecteur, d'après la méthode indiquée par l'auteur de cet ouvrage en 1882 et rappelée ici page 54, un diagramme de potentiel d'une régularité parfaite. Le fonctionnement de cette machine n'est pas troublé par la production d'étincelles. Des ouvertures sont ménagées dans les pièces polaires en vue de leur aération.

Machine Heinrich. — Cette machine a une armature en anneau dont le noyau en fil de fer présente une section transversale en forme d'U; cette armature est presque entièrement enveloppée par les épanouissements polaires des électro-aimants qui ressemblent à bien des égards à ceux des machines Siemens. L'objet de cette forme d'armature est de soumettre le plus de fil possible à l'action du champ magnétique. Des essais récemment publiés d'expériences faites sur une machine en série d'Heinrich, qui, à la vitesse de 1680 tours par minute, donnait 234 volts et 21,01 ampères, ont constaté un rendement brut de 97 à 98,9 p. 100, et un rendement net de près de 83 p. 100.

Armatures en Anneau plat.

Nous arrivons maintenant à la classe des machines dont les armatures sont en forme d'*anneaux plats*. Parmi elles, la plus ancienne est la machine Schuckert.

Machine Schuckert. — L'armature de cette machine est un anneau plat dont le noyau est formé d'un grand nombre de disques de tôle isolés l'un de l'autre. L'enroulement est identique à celui de l'anneau Gramme ou Pacinotti, et les électro-aimants ressemblent comme forme générale à ceux du type Gramme. Mais l'anneau est presque entièrement enveloppé par de larges pièces

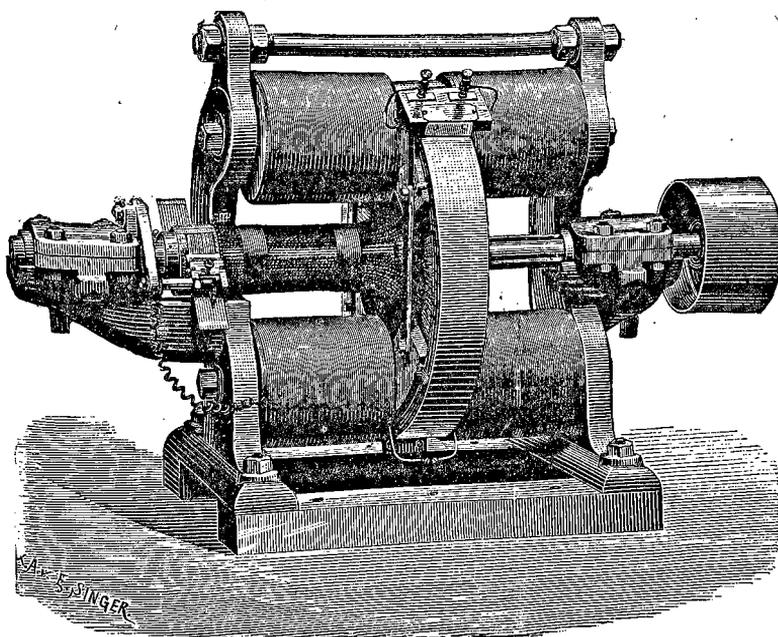


FIG. 84. — Machine Schuckert à armature en forme d'anneau plat.

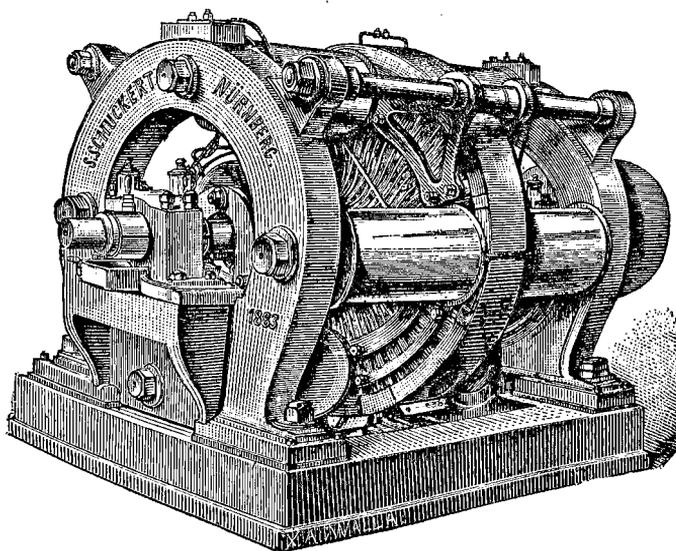


FIG. 85. — Machine compound Schuckert à quatre pôles.

polaires, dont chacune en recouvre à peu près la moitié. Le type courant de la machine est représenté dans la figure 84 qui montre en même temps la disposition prise pour un enlèvement facile de l'armature. L'anneau plat a été imaginé par M. Schuckert en vue d'obtenir une meilleure ventilation et de réduire la quantité de fil inactif comparativement à l'anneau en forme de cylindre. Dans un type plus récent, représenté figure 85, la machine a quatre pôles. Cette machine conçue pour alimenter 350 lampes à incandescence est montée en *compound*. Les résistances sont respectivement de 0,01 ohm pour l'armature, de 0,015 ohm pour les bobines d'électro-aimants en tension, et de 32 ohms pour les bobines d'électro-aimants en dérivation. Cette machine a 2 paires de balais.

Machines Gülcher. — La plus connue des machines Gülcher est également une machine à 4 pôles alternativement N. et S. L'an-

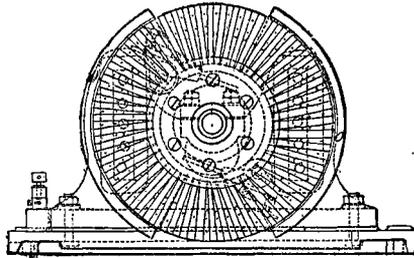


FIG. 86. — Machine Gülcher.

neau qui est formé de plaques de tôle passe en quatre points à l'intérieur de pièces polaires en fer creuses en forme de boîte, terminant des noyaux en fer forgé de forme aplatie. La figure 86 représente ce dernier type de petites dimensions.

Les électro-aimants, placés en avant et en arrière de l'anneau, sont réunis à droite et à gauche en deux pièces polaires creuses formant enveloppe au-dessus de l'anneau dont elles recouvrent une portion considérable. Le collecteur est identique à celui de Gramme, mais très massif.

M. Gülcher a récemment apporté à sa machine diverses améliorations de détail, tant au point de vue mécanique qu'au point de vue électrique. Il a particulièrement porté son attention sur la gar-

niture des électro-aimants de manière à assurer la constance de la différence de potentiel aux bornes. Après avoir essayé diverses méthodes d'enroulement compound, il est arrivé aux résultats suivants qui réalisent d'après lui les meilleures conditions de fonctionnement.

Sa machine à quatre pôles comporte huit noyaux à revêtir de bobines. Chacun d'eux reçoit une bobine de dérivation en fil fin recouverte d'une bobine de série en gros fil. Les huit bobines en fil fin sont ensuite reliées en série l'une sur l'autre et montées en dérivation sur les bornes, tandis que les huit bobines en gros fil du circuit principal sont toutes reliées en arc parallèle. Comme justification du degré de précision obtenu de cette façon, M. Gülcher a fourni à l'auteur un grand nombre de données numériques résultant d'épreuves réelles. Elles présentent une remarquable approximation de différence de potentiel constante, et une constance réelle entre des limites très étendues (voir la courbe, fig. 194). Ainsi une machine destinée à donner 65 volts, fournissait exactement cette différence de potentiel quand on faisait varier le courant extérieur de 30 à 88 ampères ; elle donnait 64 volts pour un débit de 105 ampères, et 63,5 volts pour 130 ampères. Pour un ampère seulement, la différence de potentiel était de 61,5 volts. M. Gülcher ajoute que, en dépit de tous les soins possibles dans la construction, de très grandes machines ne donnent pas des résultats aussi satisfaisants que ceux fournis par des machines de moindres dimensions, bien que les machines soient exactement du même type et que leurs éléments soient calculés d'après les mêmes formules. Dans son opinion, ceci veut dire que, pour obtenir la même *activité* et le même rendement relativement au poids, il faut accroître dans une proportion correspondante la force électromotrice de la machine. En d'autres termes, les moyens employés pour ramener dans les grandes machines la force électromotrice à égalité avec celle des petites machines sont préjudiciables à l'action de la machine.

Machine Schuckert-Mordey. — La « Corporation Anglo-Américaine de Lumière électrique » a construit, en vertu des brevets Schuckert et Mordey, une machine dynamo à anneau plat à laquelle

a été assez improprement donné le nom de dynamo « Victoria » (Victoire!). Il existe deux types de cette nouvelle machine Schuckert-Mordey; ils présentent, l'un quatre pôles, et l'autre huit pôles disposés autour de l'anneau. M. Mordey a apporté une attention spéciale à la forme des pièces polaires. Dans les premières machines Schuckert ces pièces polaires étaient, ainsi que nous l'avons vu, formées de sortes de boîtes de fer creuses, en forme de fer à cheval, qui occupaient une grande largeur angulaire autour de la circonférence de l'anneau. Des épanouissements polaires croix analogues sont encore¹ employés dans les machines Gülcher (fig. 86). Dans ses conférences antérieures, l'auteur s'était hasardé à exprimer son opinion, basée sur les diagrammes de potentiel obtenus au collecteur; il estimait que ces pièces polaires à large embrassement devaient déterminer de fausses inductions, en donnant naissance à des forces électromotrices inverses et créant des points neutres secondaires aux collecteurs. M. Mordey a reconnu l'exactitude de cette appréciation, et, à la suite de longues et laborieuses recherches, il est arrivé à la détermination d'une forme de pièce polaire qui remédie complètement à cet inconvénient. Comme on le voit à l'examen de la figure 87 qui représente la machine Victoria à 4 pôles, les pièces polaires, tout en embrassant l'anneau dans toute son épaisseur, de la périphérie externe à la périphérie interne, sont très étroites et ne recouvrent pas plus de 30 degrés de largeur angulaire de la circonférence de l'armature. Elles sont en fonte et coulées sur les noyaux cylindriques en fer doux forgé qui reçoivent les bobines. L'armature de la machine Victoria ressemble dans sa structure plutôt à l'anneau Pacinotti qu'à celui de Gramme. Son âme est formée d'anneaux découpés dans des feuilles de tôle au bois, et M. Mordey s'est spécialement attaché à éviter la formation de circuits électriques résultant de la liaison de tous les anneaux entre eux; chaque disque est électriquement et magnétiquement isolé de ses voisins. La production de courants parasites dans l'armature est ainsi presque entièrement éliminée. Il était loin d'en être ainsi dans les premières machines où, comme dans celles d'Edison, les boulons réunissant les dis-

1. Les nouvelles machines Gülcher produites à l'Exposition internationale d'hygiène (en mai 1884) ont des pièces polaires étroites et des noyaux cylindriques.

ques de l'âme offraient un champ favorable au développement d'inductions coûteuses, jusqu'au jour où le D^r Hopkinson les a améliorées. Comme dans l'anneau Pacinotti, les disques annulaires

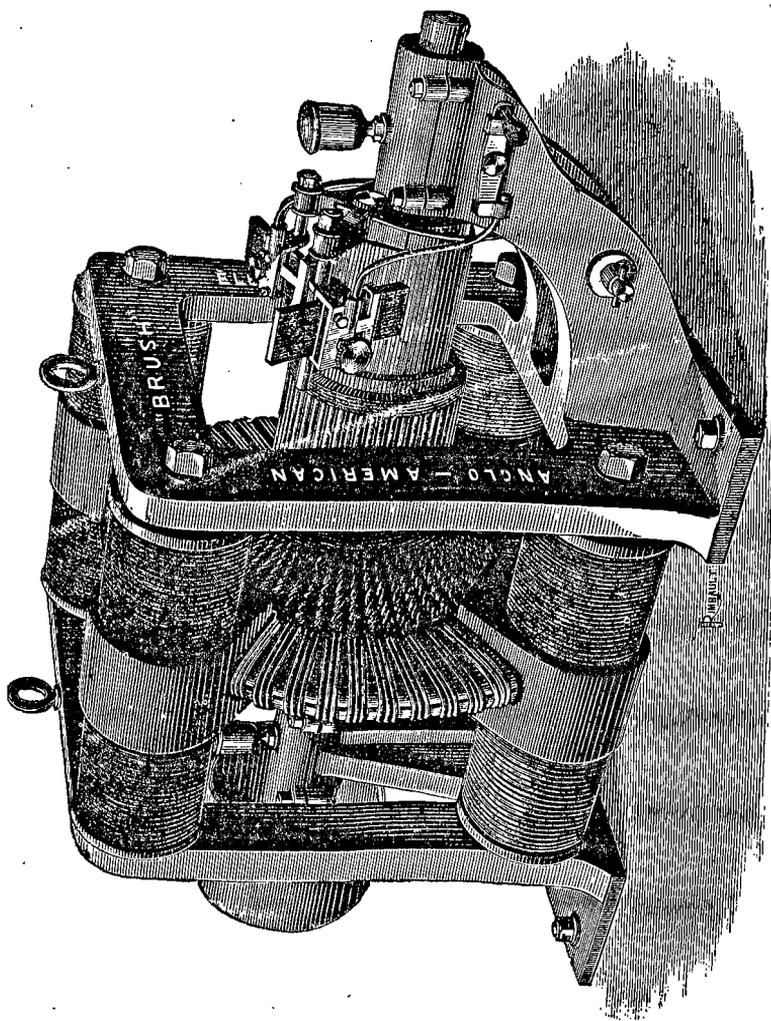


Fig. 87. — Machine Schuckert-Mordey à quatre pôles.

de l'âme sont munis de dents entre lesquelles sont enroulés les fils. L'armature est d'ailleurs largement ventilée, ce qui n'est pas à négliger. Primitivement, la machine à quatre pôles exigeait quatre balais comme les machines Gülcher et Gramme à quatre pôles. M. Mordey en a réduit le nombre à deux, et cela dans un double

but : d'abord, pour relier ensemble les sections correspondant aux bobines élémentaires de l'armature qui occupent des positions similaires par rapport aux pôles; et, en second lieu, pour relier métalliquement ensemble les lames du collecteur situées au même potentiel. Dans la machine à quatre pôles les lames opposées sont ainsi reliées deux à deux. Dès lors il n'est plus besoin que de deux balais, et ces deux balais sont à 90 degrés l'un de l'autre. La figure

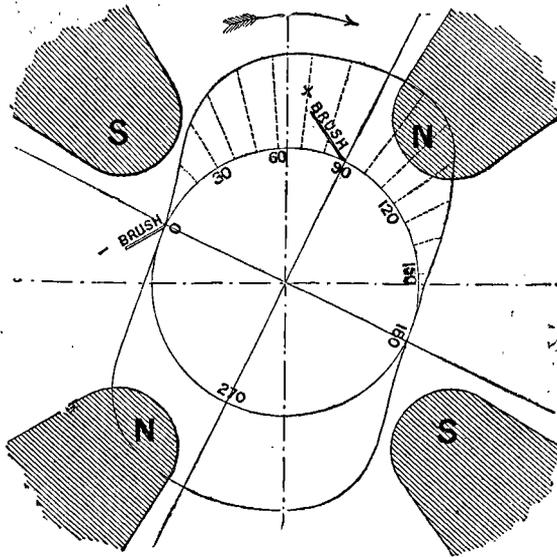


FIG. 88. — Diagramme des potentiels au collecteur de la machine Victoria.

BRUSH = Balai.

88 donne le diagramme réel des potentiels au collecteur. L'anneau étant divisé en soixante sections, il y a quinze lames au collecteur entre le balai négatif et le balai positif. Le potentiel s'élève constamment à partir du balai négatif et atteint un maximum au balai positif à 90 degrés, pour retomber ensuite à zéro à 180 degrés. Les lames du collecteur étant reliées, comme on se le rappelle, à celles qui leur sont diamétralement opposées, il en résulte que le potentiel s'élève de 180 à 270 degrés, exactement comme il s'élève de 0 à 90 degrés, et retombe ensuite à zéro en passant de 270 à 0 degrés. Si la courbe de 0 à 180 degrés était développée sur un axe horizontal, on verrait clairement combien elle s'élève et s'abaisse presque

régulièrement. Si d'après cette courbe nous en construisions une seconde dont les hauteurs d'ordonnées fussent égales à la tangente de l'angle d'inclinaison de la courbe de potentiel en ses différents points, en d'autres termes, si nous différencions cette courbe, nous obtiendrions la courbe d'induction. Elle présenterait un maximum positif vers 30 degrés et un maximum négatif vers 120 degrés, où la courbe de potentiel présente les pentes d'inclinaison les plus rapides ascendantes et descendantes. Ces maxima d'induction se trouvent situés à peu près en regard des pièces polaires, du côté vers lequel s'avance l'armature dans son mouvement. Les lignes de force du champ magnétique paraissent être plus denses en ces points. Ce déplacement du maximum d'induction fournit, selon moi, l'explication de l'infériorité des premières machines à larges épanouissements polaires. Dans ces machines la position d'induction maxima se trouvait déplacée tout à fait vers le bord de la large pièce polaire, et l'induction était, par suite, brusque et irrégulière. Il y a là un phénomène singulier : tandis que dans les machines dont l'armature en anneau est allongée en forme de cylindre les pièces polaires doivent présenter de larges embrassements, dans celles au contraire où l'anneau est aplati en forme de disque les pièces polaires ne doivent nullement s'étendre.

La machine Victoria est auto-régulatrice, ses huit bobines d'électro-aimants sont à double enroulement, les spires en circuit principal à l'intérieur, celles en dérivation à l'extérieur. La caractéristique « extérieure » de cette machine est remarquablement droite (fig. 194). Voici les résultats obtenus avec une machine « D² » construite pour donner une différence de potentiel de 60 volts : circuit ouvert, 58 volts ; 10 ampères, 58, 5 volts ; 20 ampères, 59 volts ; 60 ampères, 59, 7 volts ; 90 ampères, 59, 9 volts ; 120 ampères, 60 volts. On voit que pour de faibles charges la différence de potentiel baisse légèrement ; mais c'est dans ces conditions que pratiquement la vitesse du moteur tend généralement à s'accélérer, de sorte que la constance de la différence de potentiel entre les conducteurs est encore plus régulière que ne l'indiquent les chiffres. En fonctionnement effectif, la régulation est merveilleuse. J'ai moi-même ouvert le circuit d'une machine Victoria qui à ce moment alimentait 101 lampes, dont 100 à distance, et 1 entre les

bornes de la machine. La rupture du circuit principal à une borne détermina l'extinction immédiate des 100 lampes. Quant à la lampe restée seule sur la machine, elle ne vacilla même pas, et aucun éclair n'apparut aux balais. Les étincelles étaient si faibles qu'il était impossible de dire si la machine fonctionnait à circuit ouvert ou en plein. Le calage était le même pour toutes les charges. Peu de machines peuvent donner de semblables résultats. D'après des mesures prises par les électriciens de la « Corporation Anglo-Américaine », qui ont publié le détail des chiffres, le facteur de conversion « ou rendement brut » de cette machine est de 96,45 pour cent, et son rendement électrique de 85,68 p. 100. Ces valeurs sont établies d'après l'unité de résistance B.A. au lieu de l'ohm légal; elles sont par suite probablement trop élevées de 1 1/2 pour cent. Quelques-unes de ces machines sont montées pour marcher à de faibles vitesses en vue de l'éclairage des navires. Ces dernières ont une activité électrique un peu plus élevée et un rendement un peu plus faible que les machines à grande vitesse. Elles ont également des noyaux d'électro-aimants un peu plus lourds, qui exigent, par suite, une dépense un peu plus grande d'énergie électrique pour l'entretien du champ magnétique. Ces observations s'appliquent naturellement à une comparaison entre machines destinées à alimenter un nombre égal de lampes et à fonctionner à force électromotrice égale.

Il est bon de remarquer que, d'après les électriciens de la « Corporation Anglo-Américaine », la substitution d'un champ magnétique à quatre pôles au champ magnétique original à deux pôles employé par M. Schuckert fournissait une activité électrique exactement double pour un même anneau.

La « Corporation Anglo-Américaine » a également construit des types plus grands de machines Victoria à six et huit pôles alternativement N. et S. distribués autour de l'anneau. La machine à huit pôles alimente 750 lampes à incandescence. L'anneau a 120 sections, soit quinze sections entre chacun des pôles et son voisin. Chaque lame du collecteur étant reliée à celles qui se trouvent à 90, 180 et 270 degrés de distance à sa périphérie, deux balais seulement sont nécessaires.

Quant à la réelle supériorité des machines multipolaires à

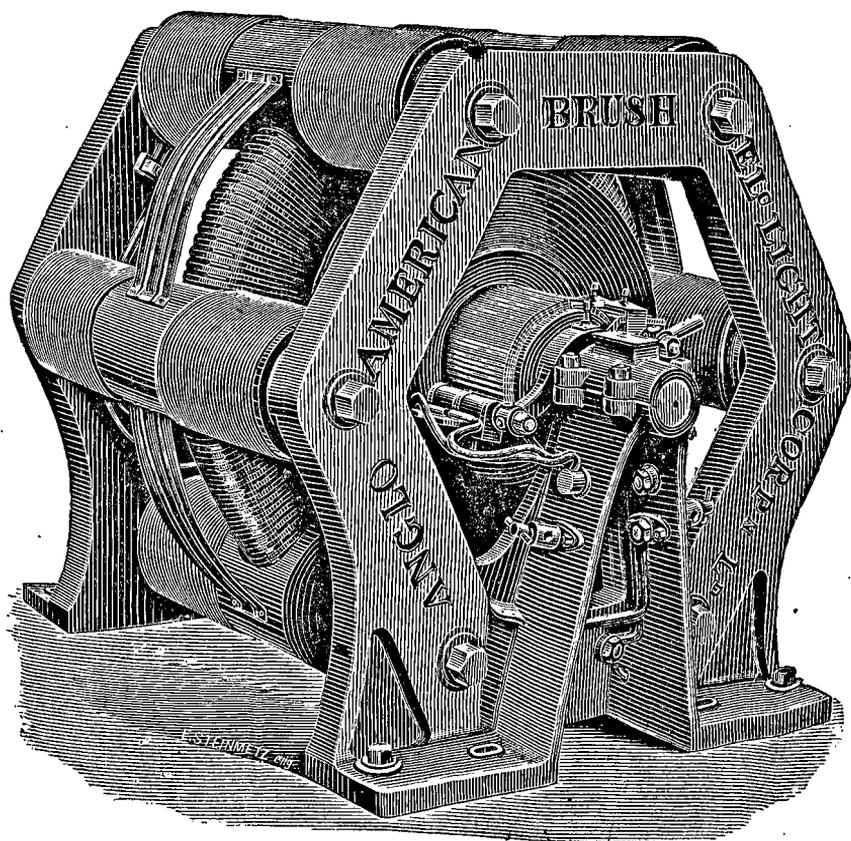


FIG. 89. — Machine Victoria (Schuckert-Mordey) à 6 pôles.

Nota. — Nous devons prémunir le lecteur contre une erreur qui pourrait résulter à première vue de l'inspection des figures 87 et 89. — Malgré le nom de « Brush » inscrit en tête des bâtis des deux machines qu'elles représentent, ces machines (et, par suite, la machine *Victoria*) ne sont pas des machines Brush. Ce sont, comme l'indiquent d'ailleurs les légendes des figures, des MACHINES SCHUCKERT-MORDEY construites en Angleterre par l'« Anglo-American Brush Electric Light Corporation ».

On verra, d'après la description de la machine Brush, que cette machine, tout à fait typique et spéciale, est absolument différente, comme conception et comme construction, des machines ici représentées.

anneau plat sur les armatures en anneau plus compact auxquelles nous a habitués la machine Gramme du type ordinaire, elle paraît indiquée, assez singulièrement il est vrai, par l'annonce faite il y a quelques mois d'une nouvelle machine améliorée imaginée par M. Gramme lui-même et qui comporterait une armature en forme d'anneau plat tournant à l'intérieur d'une couronne de 12 pôles. La *Revue industrielle* du 9 janvier 1884 a donné des dessins très complets et une description détaillée de cette dernière dynamo. Il résulte de cet article que, dans l'opinion de M. Gramme, cette nouvelle machine a encore besoin de modifications pour devenir tout à fait pratique. On peut à la simple inspection du dessin se faire une opinion raisonnée à cet égard. Les pièces polaires ont une grande largeur angulaire et arrivent presque à se toucher. Je prédirais en toute confiance, d'après cette conception, un grand nombre d'étincelles aux balais et l'échauffement des lames du collecteur. Il n'y a d'ailleurs pas moins de 12 balais! Que penser des frottements de 12 balais et de la complication que doit comporter l'installation de leurs supports? On me paraît être en Angleterre un peu en avance sur la France, relativement à la conception des machines dynamos.

La tendance actuelle vers les machines multipolaires de ce type est très significative. Il existe peu de différences, sauf dans les détails, entre les machines à quatre pôles de Gülcher, Schuckert, et la machine « Schuckert-Mordey » plus récente; ces différences ne sont cependant pas sans importance. Mais tous ces constructeurs se sont rencontrés pour adopter l'anneau plat. L'avantage primitivement revendiqué en faveur de ce mode de construction, celui de laisser inactive une moindre portion de la longueur totale du fil à l'intérieur de l'anneau, est plus imaginaire que réel, car la résistance totale de l'armature n'est qu'une faible fraction de la résistance totale du circuit; et il est possible d'étendre le champ magnétique de manière à rendre actives toutes les portions du fil sans rien gagner de ce chef si à cette extension ne correspond pas une augmentation du nombre total des lignes de force dans le champ magnétique. Voici quelles paraissent être les véritables raisons en faveur des armatures multipolaires en forme d'anneau plat : d'abord leur excellente aération; en second lieu leur faible tendance

à se détériorer par arrachement des bobines sous l'action de l'inertie tangentielle (souvent appelée à tort force centrifuge) à des vitesses considérables; enfin leur faible résistance en raison de ce que les sections élémentaires sont reliées transversalement, tant aux balais que dans l'anneau même, en arc parallèle. A ces avantages on peut ajouter que, à vitesse circonférentielle égale, l'armature tournant entre les quatre pôles est soumise à une induction double de celle qui agit sur elle lorsqu'elle tourne entre deux pôles seulement, puisqu'elle coupe deux fois autant de lignes de force dans le premier cas que dans le second. Il est enfin un dernier point dont il est moins facile d'exprimer l'avantage. Il paraîtrait, d'après certaines expériences de M. Marcel Deprez, qu'un électro-aimant, pour fonctionner dans les meilleures conditions, ne doit pas avoir en longueur plus de trois fois son épaisseur moyenne. L'anneau plat, considéré comme un électro-aimant, travaillerait plus avantageusement avec quatre pôles au lieu de deux, parce que sa longueur de pôle à pôle serait moindre comparativement à l'épaisseur de l'anneau.

Il est à mentionner également que dans les machines à double enroulement de la « Corporation Anglo-Américaine », comme dans celles de M. Crompton, les bobines en série sont montées directement sur les noyaux de fer, et les bobines en dérivation extérieurement à celles-ci, contrairement à la disposition adoptée par MM. Siemens et par M. Gülcher. Il semblerait que la théorie dût servir de guide dans le choix de la meilleure disposition à cet égard: Si les bobines de dérivation en fil fin sont à l'extérieur, la dépense première, à puissance magnétisante égale, est vraisemblablement plus grande. Si les bobines en série sont à l'extérieur, la perte par échauffement, à égalité de production de champ magnétique, se trouve vraisemblablement accrue. On serait tenté de croire que, comme pour les bobines des galvanomètres, il doit être avantageux de loger, sur les bobines des électro-aimants, le plus grand nombre de tours aussi près que possible du noyau, et par suite d'enrouler le fil fin avant le gros fil. Mais, d'un autre côté, il y a intérêt à diminuer la résistance des bobines en série qui font partie du circuit principal; tandis que la résistance additionnelle résultant de l'enroulement du fil en spires d'un diamètre supérieur

n'est nullement un inconvénient dans une bobine en dérivation. Si tel est le véritable jour sous lequel le problème doit être envisagé, nous enroulerions les spires en dérivation à l'extérieur des spires en série sur le circuit principal.

Machine Brush. — Parmi les dynamos, l'une des plus connues, mais des moins bien comprises, est la machine Brush. La figure 90 permet d'en concevoir la forme générale et la disposition des électroaimants. Son armature — de forme annulaire, non entièrement recouverte de fil, mais garnie, comme l'anneau de Pacinotti, de dents en saillie entre les bobines élémentaires, — est unique. Bien qu'elle ressemble à cet égard à l'anneau de Pacinotti, elle en diffère plus que ce dernier ne diffère des armatures Siemens, Gramme, Edison, Bürgin, etc. Dans toutes ces armatures, en effet, les sections successives sont couplées en série sur tout le pourtour de l'anneau et constituent en quelque sorte une bobine continue; dans la machine Brush, au contraire, cette continuité n'existe pas. Les bobines élémentaires sont réunies deux à deux, l'une à celle qui lui est diamétralement opposée, et soigneusement isolées de leurs voisines. Chaque paire de bobines élémentaires comporte un commutateur spécial, de sorte qu'à un anneau ordinaire de huit bobines élémentaires correspondent quatre commutateurs distincts, — un par paire de bobines, — montés sur l'arbre l'un à côté de l'autre. Dans la machine de grandes dimensions telle que celle représentée dans la figure 90, l'armature comporte douze bobines, six commutateurs groupés en trois paires, et trois jeux de balais. Cette machine est destinée à alimenter 40 foyers à arc. Les machines plus petites pour 16 foyers n'ont que huit bobines à l'armature. Les balais sont disposés de manière à toucher en même temps les commutateurs de deux paires de bobines, mais non ceux de deux paires adjacentes, les commutateurs voisins étant toujours reliés à deux paires de bobines situées sur l'anneau à angles droits l'une par rapport à l'autre. Le diagramme donné par la figure 91 permet de se rendre un compte plus exact de cette disposition. Dans cette figure, les huit bobines sont numérotées par paires au nombre de quatre, et chaque paire est munie de son commutateur spécial, auquel aboutissent les extrémités extérieures du

Nombre des foyers 40

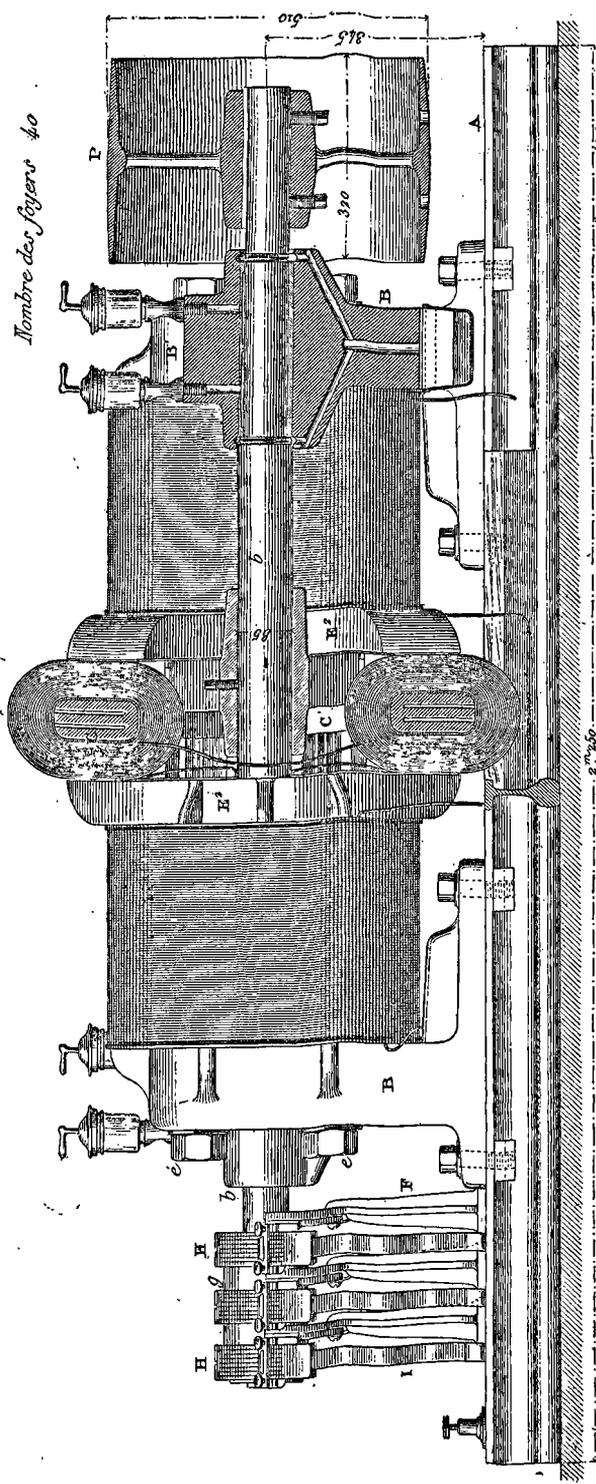


Fig. 90. — Machine Brush de 40 foyers.

fil de chaque bobine, les extrémités intérieures des deux bobines étant reliées transversalement l'une à l'autre (cette disposition n'est pas visible dans le diagramme). Dans la machine réelle, la con-

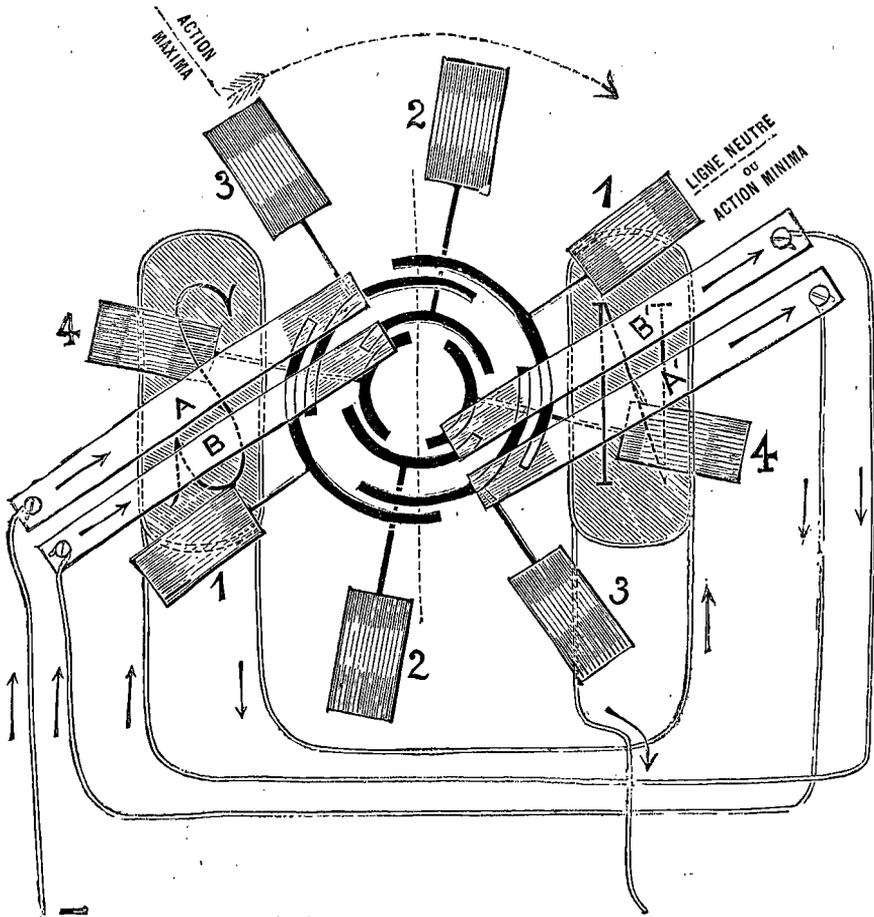


FIG. 91. — Connexions de la machine Brush.

nexion est coupée pour chaque paire de bobines au moment où celle-ci passe au point d'action minima (c'est-à-dire quand son plan est perpendiculaire à la direction des lignes de force du champ magnétique, et quand le nombre des lignes de force qui la traversent est *maximum* et le taux d'interversion de ces lignes de force *minimum*). On obtient ce résultat en laissant entre les extré-

mités des deux moitiés du commutateur un espace d'un huitième environ de la circonférence. On voit dans la figure que les bobines 1, 1, sont *hors du circuit*. Aucune des deux moitiés du commutateur correspondant n'est en contact avec les balais. Dans cette position, cependant, les bobines 3, 3, à angles droits avec 1, 1, sont dans la position d'action maxima, et le courant énergiquement induit en elles s'écoule du balai marqué A (qui est, par conséquent, le balai négatif) à celui marqué A'. Ce balai est relié transversalement au balai marqué B, par lequel le courant pénètre de nouveau dans l'armature. A ce moment, les bobines 2, 2, viennent juste d'abandonner la position d'action maxima, et les bobines 4, 4, commencent à s'en approcher. Il se produit, par conséquent, un commencement d'induction partielle dans ces deux paires de bobines. Dans ces conditions, le montage est fait de telle sorte que le courant, en arrivant en B, se divise en deux parties, dont l'une traverse les bobines 2, 2, l'autre les bobines 4, 4, pour se réunir au balai B', d'où le courant pénètre dans les spires des électro-aimants qu'il excite, passe dans le circuit extérieur et revient au balai A. (Dans certaines machines, le montage est fait de telle sorte que le courant parcourt les électro-aimants en quittant le balai A' et avant d'atteindre le balai B; dans ce cas, on définit souvent la machine, inexactement il est vrai, en disant que ses bobines, dans la rotation, alimentent alternativement les électro-aimants et le circuit extérieur). Le mouvement de l'armature amène alors les bobines 2, 2, dans la position de moindre action quand elles sont mises hors du circuit, et le même fonctionnement se renouvelle avec un léger changement seulement dans l'ordre de l'opération. On peut résumer de la manière suivante l'ordre successif des connexions pendant une demi-révolution :

Première position. (Bobines 1 hors du circuit.)

A—3—A'; B < $\frac{4}{2}$ > B'; Électro-aimants — Circuit extérieur — A.

Seconde position. (Bobines 2 hors du circuit.)

A < $\frac{1}{3}$ > A'; B—4—B'; Électro-aimants — Circuit extérieur — A.

Troisième position. (Bobines 3 hors du circuit.)

$A - 1 - A'$; $B < \frac{2}{4} > B'$; Électro-aimants — Circuit extérieur — A

Quatrième position. (Bobines 4 hors du circuit.)

$A < \frac{3}{1} > A'$; $B - 2 - B'$; Électro-aimants — Circuit extérieur — A.

On voit par là que, quelle que soit la paire de bobines dans la position d'action maxima, elle envoie son courant directement dans le circuit; tandis que les deux paires de bobines qui occupent les positions secondaires sont toujours reliées parallèlement, la même paire de balais touchant les commutateurs respectifs des deux.

Il résulte de la disposition particulière ici adoptée que, si l'on mesure les potentiels autour de l'un des commutateurs à l'aide d'un voltmètre, on obtient un résultat complètement différent de celui fourni par les autres machines. Pour un huitième de la circonférence de chaque côté du balai positif, il n'y a pas de différence sensible de potentiel. Puis vient une région pour laquelle le potentiel paraît baisser; mais ici cette chute est due en partie à la courte durée de l'espace de temps pendant lequel le balai mobile, relié au voltmètre, et le balai positif fixe sont tous deux en contact avec la même partie du commutateur. On trouve ensuite une région pour laquelle le voltmètre ne donne aucune indication, c'est celle qui correspond à la position de mise hors circuit; puis enfin, de chaque côté du balai négatif, apparaît une région où la polarité et le potentiel sont les mêmes que ceux du balai négatif. La figure 92 donne ce diagramme pour une machine Brush à six foyers, pris à l'un des commutateurs, le balai positif principal étant néanmoins maintenu (comme dans sa position ordinaire) en contact à la fois avec ce commutateur et le commutateur voisin.

D'après les considérations qui précèdent, il est évident que les quatre paires de bobines de la machine Brush constituent en réalité quatre machines séparées, dont chacune fournit des courants alternatifs à un commutateur qui les transforme en courants intermittents de même sens dans les balais, et que ces machines indépendantes sont ingénieusement reliées par paires, grâce à la disposi-

tion qui fait appuyer une paire de balais sur les commutateurs de deux paires de bobines; enfin, que ces machines accouplées sont ensuite reliées en série par la connexion établie du balai A' au balai B.

L'expérience suivante¹ montre l'indépendance des quatre paires de bobines dans la machine Brush. On enlève les commutateurs ordinaires d'une petite machine Brush et on les remplace par huit bagues en bronze, à chacune desquelles on relie une des extrémités de l'une des quatre paires de bobines. Huit balais séparés viennent presser contre ces bagues, et le circuit de chacune des quatre paires de bobines est complété, comme l'indique la figure 93, par un galvanomètre détecteur ordinaire. Si l'on fait alors tourner à la main

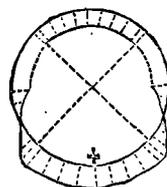


Fig. 92. — Potentiel au Commutateur d'une machine Brush.

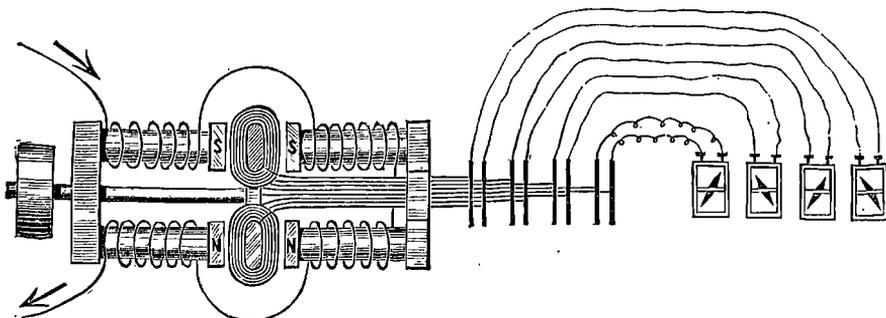


Fig. 93. — Machine Brush montée avec quatre galvanomètres détecteurs montrant le courant alternatif induit par chaque paire de bobines indépendamment des autres.

l'armature à une vitesse modérée, les aiguilles des quatre détecteurs se mettent à osciller à droite et à gauche sous l'influence des courants alternatifs, non pas synchroniquement, mais l'un après l'autre. Si l'on vient à rompre l'un des quatre circuits, les autres continuent à fonctionner comme précédemment.

Le noyau de l'anneau Brush est en fonte malléable; de profondes rainures y sont réservées sur les côtés pour obvier dans une certaine mesure à la formation de courants parasites. Les bobines sont roulées dans de larges entailles radiales. On distingue

1. Cette remarquable expérience est due à M. P. Allen.

la forme de l'anneau avec ses bobines dans la figure 90. Comme armature il paraît sujet à des réactions nuisibles très prononcées qui déterminent une diminution considérable de force électromotrice indiquée par la caractéristique de la machine (fig. 176). Dans les machines les plus récentes, on a substitué à l'anneau primitif un anneau formé de cercles minces; aussi pour ces dernières la caractéristique est-elle plus tendue. Dans un grand nombre de machines Brush, on rencontre un double enroulement, un circuit de dérivation ou « teaser » étant ajouté pour maintenir l'aimantation des électro-aimants quand le circuit principal est ouvert. Plus récemment ces machines ont été pourvues d'un régulateur automatique sommairement décrit page 102. Il paraît hors de doute que la machine Brush, quoique susceptible de donner une force électromotrice très considérable et par suite apte à l'alimentation d'un grand nombre de foyers à arc sur un même circuit, doit à tous égards céder le pas, dans la plupart des applications, à des types de dynamos plus modernes.

La seule autre machine où l'on rencontre un commutateur de tous points analogue à celui de la machine Brush est la machine Newton dont il est question plus loin, page 157. Les machines à commutateurs de ce genre, qui laissent les circuits d'un certain nombre de bobines de l'armature ouverts pendant une partie de la rotation, sont souvent désignées sous le nom de dynamos « à circuit ouvert » par opposition à celles des types Gramme et Siemens dans lesquelles les bobines sont en un circuit continu. — La machine Houston-Thomson (page 158) est parfois classée au nombre des dynamos à circuit ouvert.

Autres machines à armature annulaire. — Il existe plusieurs autres machines dynamos à armature en forme d'anneau. — Dans celle de Fein, les pièces polaires sont ramenées à l'intérieur de l'anneau cylindrique dans le but d'utiliser le fil situé à sa surface interne. — On trouve une disposition analogue dans les machines de Schwerd et Scharnweber, — et de Jürgensen et Lorenz qui font également usage d'électro-aimants internes. — Dans une machine de Fitzgerald, l'anneau est presque entièrement enveloppé par les électro-aimants relativement petits. — M. Edelman de Munich

construit une dynamo à anneau cylindrique disposé entre les extrémités de deux forts électro-aimants. — La machine Lumley comporte également un anneau cylindrique monté sur un noyau formé de disques annulaires en tôle estampés, munis de saillies qui se projettent vers le centre pour conduire la chaleur développée à l'arbre central. — A l'Exposition de 1881, à Paris, MM. Siemens ont exposé une machine dans laquelle le champ magnétique formé d'une simple bobine en navette tournait à l'intérieur d'une armature annulaire fixe. Les balais de cette dynamo, dite « machine Pot », participaient au mouvement en appuyant sur un collecteur fixe. — On pourra trouver des renseignements sur plusieurs de ces machines et sur d'autres moins connues dans l'*Electric Illumination* de Dredge, dans le Rapport officiel de l'Exposition de Munich de 1882, dans les *Magnet-und Dynamo-Elektrischen Maschinen* de Schellen et dans les journaux périodiques spécialement affectés à l'électricité.

Armatures Cylindriques.

Machine Siemens. — Les armatures cylindriques (ou en forme de tambour) de tous types peuvent être regardées comme des modifications de l'armature universellement connue sous le nom de bobine Siemens (1855) et à enroulement longitudinal, en forme de navette ou en double T, dans laquelle les sections ou bobines élémentaires ont été multipliées de manière à assurer la continuité pratique du courant. Le type actuel de bobines a été imaginé en 1872 par M. von Hefner Alteneck, de la maison Siemens et Halske de Berlin.

Dans quelques-uns des premiers types de machines Siemens, les carcasses des armatures cylindriques sont en bois et recouvertes circonférentiellement de fil de fer avant de recevoir l'enroulement longitudinal en fil de cuivre. Dans d'autres, le tambour est creux et tourne autour d'une âme en fer immobile; d'autres machines enfin ont leur bobine complètement dépourvue de fer, à l'exception de l'arbre qui l'entraîne. Dans toutes les armatures Siemens les bobines élémentaires occupent des positions diamétrales symétriques par rapport à la carcasse cylindrique, mais le mode de con-

nexion de ces sections entre elles n'est pas le même pour toutes. Dans l'ancien enroulement Siemens-Alteneck, ces sections n'étaient

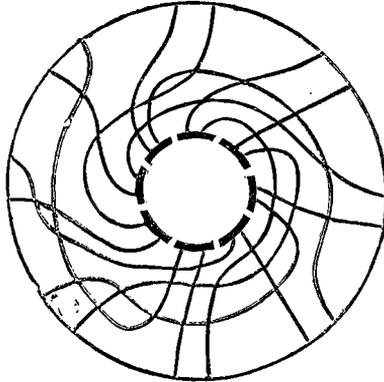


FIG. 94. — Diagramme des connexions de l'ancien enroulement Siemens.

pas reliées entre elles symétriquement, comme on le voit à l'inspection de la figure 94 qui représente les connexions pour un collecteur

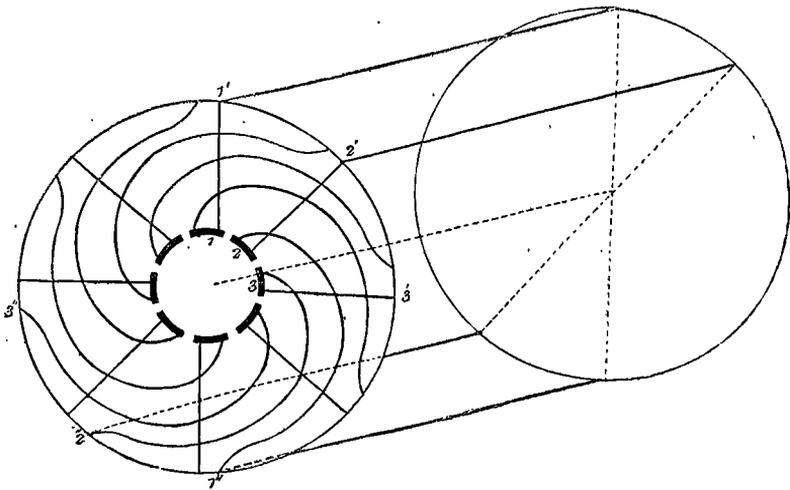


FIG. 95. — Diagramme des connexions du nouvel enroulement Siemens.

réduit à 8 lames. Dans les machines plus récentes, on a adopté un mode de connexion symétrique, comme l'indique la figure 95. Dans ce système, comme dans l'anneau Gramme, les sections successives ou bobines élémentaires disposées autour de l'armature sont reliées

entre elles d'une façon continue, la fin d'une section et le commencement de la suivante aboutissant toutes deux à une même lame (ou segment) du collecteur. La disposition symétrique est naturellement préférable, non pas seulement au point de vue de la facilité de la construction, mais parce qu'il est important d'éviter entre deux lames voisines du collecteur une grande différence de potentiel, qui se traduit par une tendance trop grande à la production d'étincelles et à la formation d'arcs à travers l'espace qui les sépare. Dans le schéma représenté par la figure 95, les huit sections sont,

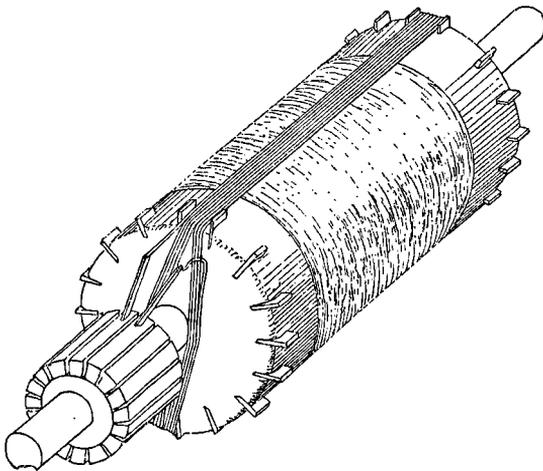


Fig. 96. — Mode d'enroulement de l'armature Siemens.

pour plus de simplicité, réduites chacune à un seul tour de fil. En partant par exemple de la lame du collecteur marquée 1, le fil commence par monter en 1'; puis il longe le cylindre suivant une de ses génératrices pour redescendre diamétralement par l'autre base du cylindre d'où il revient en longeant la partie inférieure du cylindre au point marqué 1'', et de là à la seconde lame du collecteur; de cette seconde lame part la seconde section ou bobine élémentaire dont l'enroulement procède de la même manière. Les armatures Siemens ordinaires comportent en réalité huit tours de fil par section : le fil, après être monté en 1', forme huit spires le long du cylindre avant de revenir finalement rejoindre la seconde lame.

Le mode de construction actuel de l'armature est représenté par la figure 96. — Sur l'arbre sont assujettis, au moyen de goupilles,

T

TYPES DE MACHINES.

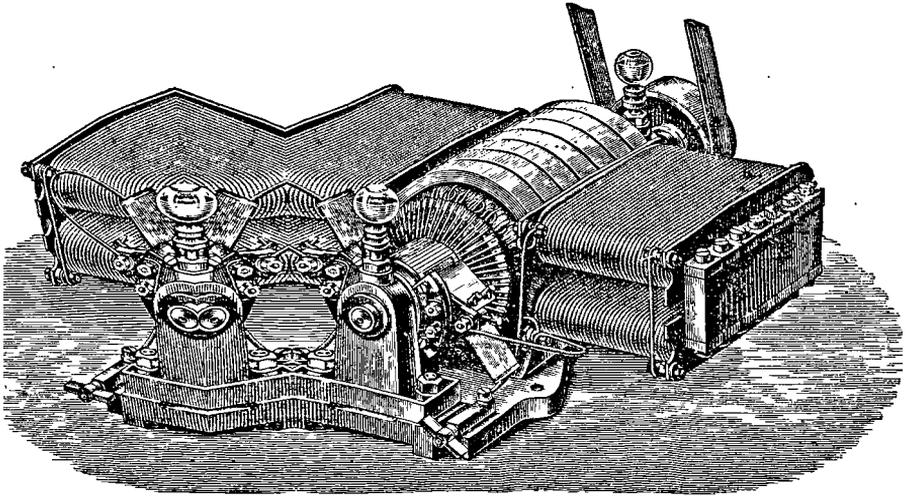


FIG. 98 .or FIG. 97. — Machine Siemens, type horizontal.

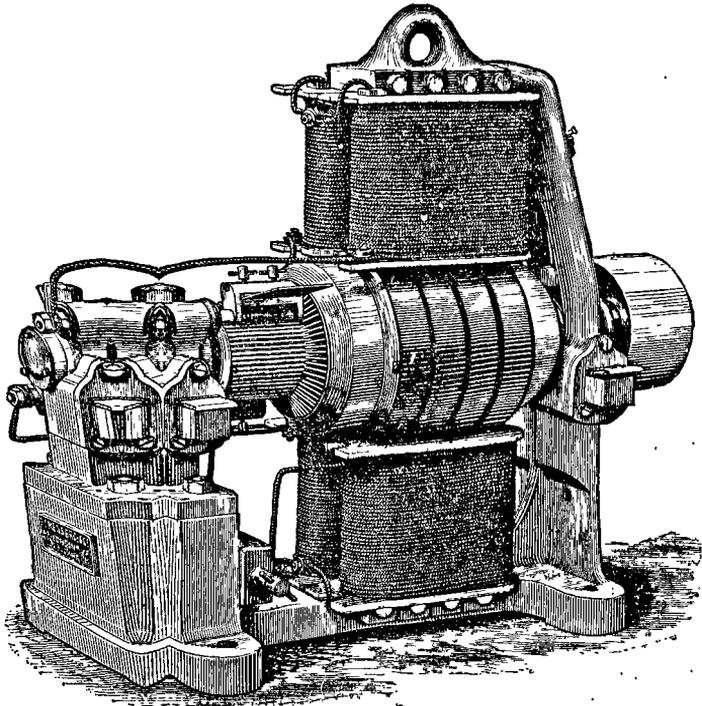


FIG. 98. — Machine Siemens, type vertical.

deux robustes tourteaux de bronze qui forment les bases de la carcasse cylindrique. Entre ces tourteaux est roulée une feuille de tôle mince fixée sur des épaulements réservés à cet effet sur leur bord interne; autour de cette carcasse est enroulée une grande masse de fil de fer doux, qui constitue l'âme de la bobine comme dans l'anneau Gramme. Des entailles en nombre égal à celui des sections que doit avoir la bobine sont pratiquées sur les bords des faces extérieures des tourteaux en bronze; on y loge de petites séparations en bois pour faciliter l'enroulement. Quant au bobinage même des sections, il est fait de la manière suivante : — Le fil est tendu le long du cylindre comme le montre la figure, quatre spires passant à gauche de l'arbre et quatre à droite; de là il est renversé sur lui-même pour aboutir à la lamelle qui le relie à la seconde lame du collecteur. La section suivante part de cette même lame et est conduite de même; mais avant de procéder à son enroulement, on fait tourner le cylindre d'un demi-tour sur lui-même et la section diamétralement opposée à la section n° 1 est roulée comme précédemment par-dessus les huit premières spires déjà placées. Ainsi, dans une armature en 16 sections, la section n° 9 se trouve superposée à la section n° 1, la section n° 10 à la section n° 2, et ainsi de suite, le cylindre étant sur toute sa surface recouvert de deux couches de bobines distinctes. L'objet de cette disposition est d'éviter tout rapprochement et tout contact possible entre des parties situées à des potentiels très différents. Pour faciliter l'intelligence des connexions, on a représenté le collecteur en place sur l'arbre dans la figure 96; il n'est cependant réellement posé qu'après l'enroulement complet de toutes les sections; les extrémités des fils sont, en attendant, respectivement liées ensemble ou fixées aux petits bois jusqu'à ce qu'elles puissent être soudées aux lamelles de cuivre les reliant au collecteur. Dans certaines armatures de machines destinées à l'électro-métallurgie, les couches de fil sont au nombre de quatre et les fils sont reliés parallèlement par quatre ou huit à la fois, de manière à présenter une résistance moindre.

Les électro-aimants sont formés d'une série de noyaux en fer forgé, cintrés en leur milieu pour laisser passer l'armature et reliés par une entretoise à leurs extrémités : les bobines qui les revêtent

sont roulées sur des carcasses en tôle à joues de laiton et insérées sur les noyaux avant leur réunion par les entretoises. Dans les

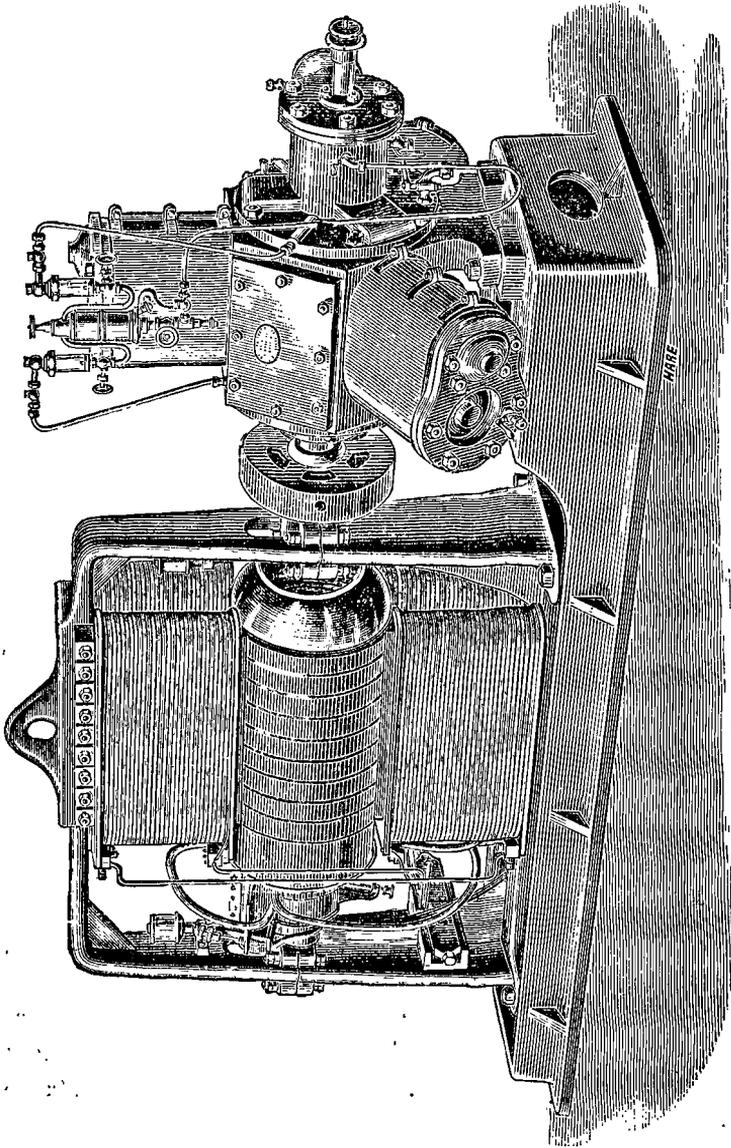


Fig. 99. — Machine Siemens compound actionnée par un moteur Brotherhood.

premiers types de machines Siemens, les électro-aimants étaient disposés horizontalement (fig. 97).

Dans les machines plus récentes on a préféré la disposition verticale représentée dans les figures 98 et 99. Dans toutes ces machines les noyaux cintrés sont démontables, et dans les machines de grandes dimensions la partie supérieure du bâti peut être séparée de la partie inférieure à laquelle elle est reliée par des boulons. Dans les machines les plus récentes il a été pourvu à la ventilation des électro-aimants ; les carcasses de leurs bobines présentent à cet effet un espace libre réservé à l'extérieur, entre le fil et les noyaux, pour la circulation de l'air.

Quelques renseignements sur les machines montées en *compound* construites dans les divers établissements de MM. Siemens ont été donnés par M. E. Richter dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift*. On y voit que trois méthodes de combinaison des électro-aimants ont été essayées. Les bobines en série et en dérivation ont été montées séparément sur les quatre branches des électro-aimants (les bobines semblables tantôt du même côté de l'armature par rapport à la ligne neutre, tantôt en diagonales) ; elles ont été roulées sur des carcasses séparées de demi-hauteur et montées deux à deux, l'une en gros fil, et l'autre en fil fin, sur chaque branche ; enfin elles ont également été roulées chacune de gros fil et de fil fin superposés. Dans les machines les plus récentes, l'enroulement de gros fil (en série) est extérieur à l'enroulement de fil fin (en dérivation). A en juger par les courbes données il y a quelque temps déjà, la régulation n'était pas encore parfaite. Le meilleur résultat était celui d'une machine DSD¹⁷ dans laquelle deux des branches d'électro-aimants étaient recouvertes de bobines en dérivation de 29 couches de fil de 1 millimètre, et les deux autres de deux couches de fil de 3, 5 millimètres. La différence de potentiel variait de 64 à 69 volts quand le nombre des lampes alimentées était réduit de 20 à 9 (voir la courbe, fig. 194). — Depuis, la maison a construit des machines dans lesquelles la différence de potentiel ne varie pas de 1 p. 100 quand on passe d'une lampe au maximum de ce qu'elles peuvent alimenter. — La machine Siemens à courants alternatifs est décrite plus loin en son lieu et place (p. 170).

Machine Edison. — Il existe plusieurs formes de machines Edison, toutes constituées par des armatures cylindriques (copies

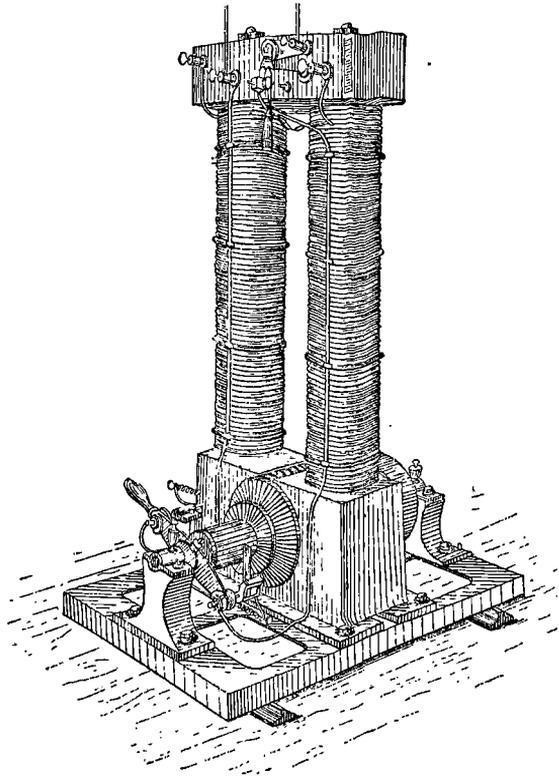


FIG. 100. — Machine Edison, type « Z ».

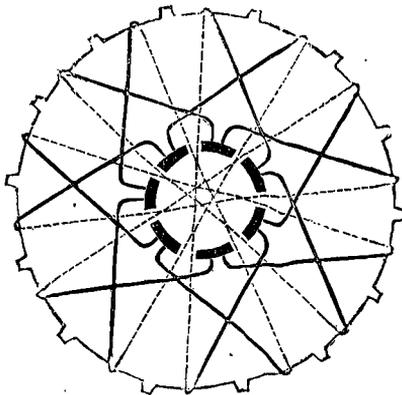


FIG. 101. — Diagramme de l'armature Edison.

de la bobine Siemens) mobiles entre de lourdes pièces polaires en fer. La machine « Z » capable d'alimenter soixante lampes Edison est représentée par la figure 100. Les électro-aimants sont d'une lon-

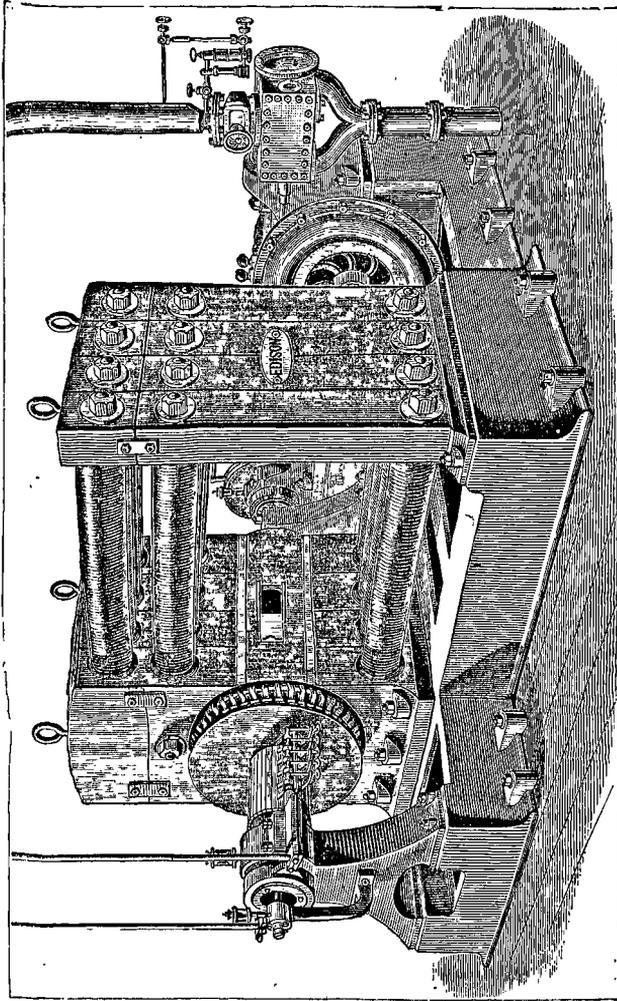


FIG. 102. — « Dynamo à vapeur » d'Edison.

gueur démesurée, de section circulaire, et surmontés d'une culasse massive à la partie supérieure. Les noyaux ne comportent qu'une seule couche de fil. Dans la modification apportée par Edison à l'armature cylindrique Siemens, l'enroulement, bien que symétrique à un certain point de vue, présente cette singularité que le

nombre des sections est impair. Dans les premières machines, le collecteur était à sept sections, comme l'indique la figure 101, relevée dans la spécification du brevet anglais d'Edison. Dans ses dernières machines géantes (fig. 102), le nombre des sections est de quarante-neuf. Il résulte de cette particularité de construction que, si les balais sont diamétralement opposés l'un à l'autre, ils ne passent pas au même instant d'une section à l'autre du collecteur; l'un deux touche le milieu d'une lame du collecteur au moment où l'autre passe d'une lame à l'autre. L'armature de ces grandes machines d'Edison n'est pas formée de fil, mais de barres de cuivre rigides disposées suivant les génératrices d'un cylindre, comme dans certaines machines Siemens pour la galvanoplastie ou l'in-

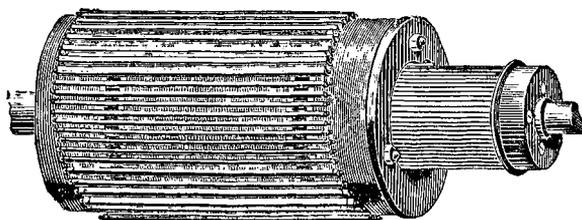


Fig. 103. — Armature de la machine Edison.

candescence. La figure 103 représente l'armature enlevée de la machine. Les extrémités des barres de cuivre sont reliées transversalement par des rondelles ou disques de cuivre isolés l'un de l'autre, et présentant des saillies auxquelles sont fixées les barres de cuivre. Ces disques offrent beaucoup moins de résistance que de simples bandes métalliques. Le diagramme de la figure 104 permet de se rendre mieux compte de la manière dont sont établies les connexions. Elles sont faites dans l'ordre suivant : — Chacune des 49 lames du collecteur est reliée à l'un des 49 disques correspondants situés à la partie antérieure de la bobine; ce disque est lui-même relié, par une sorte de dent en saillie, à l'une des 98 barres de cuivre. Le courant engendré dans cette barre — par exemple dans la plus haute des trois barres représentées dans la figure 104 — est conduit par elle, à l'extrémité opposée de la machine; là, il pénètre dans l'un des disques qui y sont disposés; il traverse ce disque et revient par une barre diamétralement opposée à celle qui lui a servi

de point de départ. L'extrémité antérieure de cette barre est reliée à l'une des dents, non pas du disque voisin mais du suivant par rapport à celui par lequel nous avons commencé à indiquer les connexions; elle rejoint par ce disque non pas la barre voisine, mais la suivante par rapport à celle considérée en premier lieu, et ainsi de suite. Les deux dents saillantes de chacun des disques à la partie antérieure ne sont pas, en conséquence, diamétralement opposées l'une à l'autre; les connexions avancent d'un quarante-neuvième de la circonférence à chacune des quarante-neuf sections.

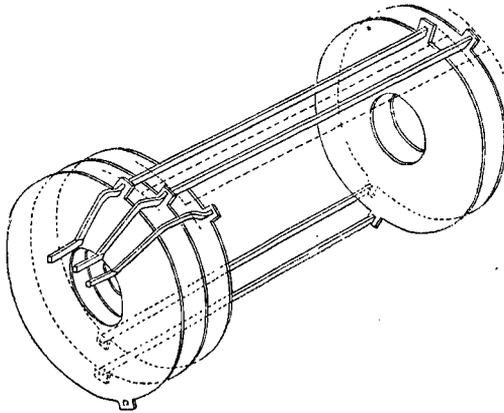


FIG. 104. — Connexions de l'armature Edison.

Pour simplifier le dessin, on a représenté seulement par des lignes ponctuées les disques et les barres alternés avec ceux indiqués en plein. Les deux barres représentées à la partie inférieure étant précisément les barres de retour des courants venant des barres supérieures, il doit également exister à la partie supérieure des barres de retour pour les courants provenant des barres (non représentées dans la figure) qui partent des segments de la moitié inférieure du collecteur. Les lignes ponctuées indiquent la position de ces barres de retour. Comme on peut le voir à l'examen de la figure 102, le collecteur est très solidement établi, et un écran est interposé entre le collecteur et le reste de l'armature afin d'empêcher toute poussière de cuivre de se répandre et de compromettre l'isolement entre les barres et les disques. Il n'y a pas moins de 5 paires de balais, ce qui réduit notablement la tendance à la production

d'étincelles. La figure ne montre pas la structure de l'armature elle-même; elle n'indique pas non plus les moyens employés pour éliminer les courants parasites. L'âme de l'armature est formée de disques de fer très minces, séparés l'un de l'autre par du mica ou du carton d'amiante, et serrés ensemble. On peut faire une objection à l'emploi des barres épaisses de cuivre : c'est qu'elles sont plus susceptibles de s'échauffer sous l'action de courants locaux que ne le feraient des faisceaux de bandes ou des lames de cuivre; et, en fait, la présence d'un ventilateur, absorbant 4 chevaux de force, pour refroidir l'armature, laisse supposer que l'armature s'échaufferait par une rotation prolongée.

Les électro-aimants de toutes les grandes machines abandonnées par Edison sont constitués par de fortes colonnes en fer servant de noyaux aux bobines. L'expérience a prouvé que cette disposition est défectueuse.

La machine Edison a reçu dans ces derniers temps d'importantes améliorations dues au D^r John Hopkinson. Parmi ces améliorations; les unes portent sur les électro-aimants, les autres sur l'armature. Le D^r Hopkinson a tout d'abord supprimé l'emploi des électro-aimants multiples, qui dans les machines Edison « L », « K », et « E » étaient reliés à des pièces polaires communes; et, au lieu d'employer deux, trois, ou plusieurs piliers ronds en fer, roulés de fil chacun séparément, il a réuni une masse égale de fer en une seule pièce massive de section transversale beaucoup plus grande, et de longueur un peu moindre. Une seule masse de fer de ce genre, de section généralement ovale ou oblongue, est solidement fixée à chaque pièce polaire, et ces deux masses sont réunies à leur partie supérieure par une culasse de fer encore plus forte. Les machines ont, par suite, une apparence plus ramassée et plus compacte que précédemment (fig. 105). Il est bon de remarquer en passant que l'emploi de piliers multiples en fer (adoptés par Edison dans ses machines « L », « K », et « E ») devait être nuisible en ce que les courants dans les portions de bobines passant entre deux colonnes de fer adjacentes se contrariaient certainement par opposition mutuelle de leur action magnétisante. Le D^r Hopkinson a encore amélioré les électro-aimants en employant pour leurs bobines du fil de cuivre de section carrée recouvert d'un ruban isolant. Ce fil se masse mieux

autour des noyaux de fer qu'un fil rond ordinaire. Quant aux armatures, il y a apporté les modifications suivantes. L'âme de fer,

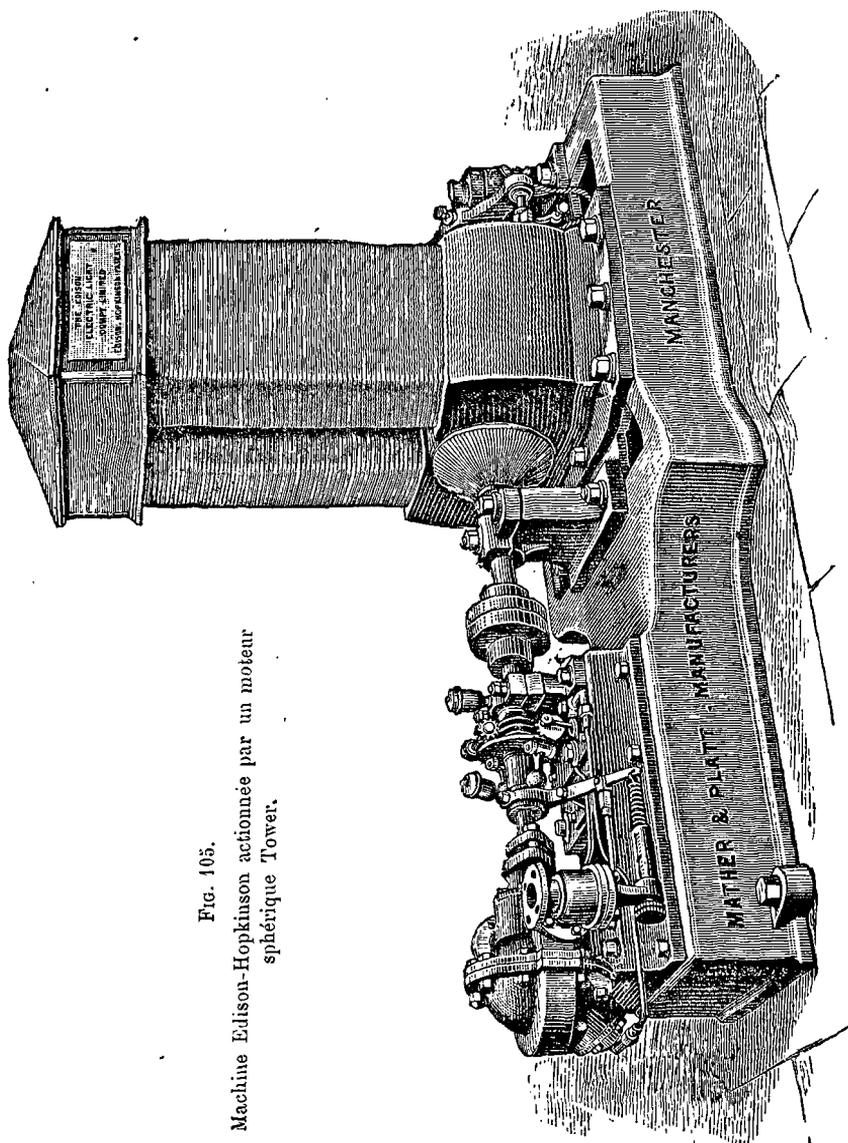


Fig. 105.

Machine Edison-Hopkinson actionnée par un moteur sphérique Tower.

dans les anciennes machines Edison, était formée de disques de tôle mince, séparés par du papier, montés sur un noyau en gaïac et

maintenus par six boulons longitudinaux qui, traversant les disques en question, étaient eux-mêmes assujettis par des écrous pressant contre les plateaux extrêmes. Ces boulons ont été supprimés et les plateaux réunis par de grandes rondelles montées à vis sur l'arbre même de l'armature. La section du trou central des plaques a été diminuée, laissant ainsi plus de fer à l'intérieur et une section transversale plus grande offerte à l'induction magnétique. Grâce à ces améliorations, une machine occupant le même espace sur le sol et à peu près du même poids que l'ancienne machine « L » à 150 lumières, est capable d'alimenter 250 lampes, avec un rendement en même temps supérieur. Dans la nouvelle machine à 250 lumières, l'armature a un diamètre de 25 centimètres; sa résistance à froid est de 0,02 ohm; celle des électro-aimants de 17 ohms. La caractéristique de la machine montre que, lors même qu'elle fonctionne en pleine charge, les électro-aimants sont loin d'être saturés. Il est évident que, dans l'ancien mode de construction, les boulons et les plaques terminales qu'ils reliaient formaient un circuit constamment parcouru par des courants parasites qui consommaient inutilement de l'énergie en déterminant un échauffement correspondant. Une machine Edison « Z » de 60 lumières, ancien type, essayée par le comité de l'Exposition de Munich, a donné un rendement qui, mesuré par le rapport du travail électrique extérieur au travail électrique total, dépassait 87 p. 100; mais son rendement commercial — c'est-à-dire le rapport du travail électrique extérieur à l'énergie mécanique fournie à la poulie — n'était que de 58,7 p. 100 au maximum. Dans une épreuve récemment faite par M. Sprague, à Manchester, sur une machine améliorée (de 200 lumières), le rendement de conversion électrique dépassait 94 p. 100, et le rendement commercial 85 p. 100¹.

Machine Weston. — M. Weston a successivement créé un certain nombre de types de machines; l'une des premières était une petite machine à galvanoplastie avec armature à pôles analogue à l'ancienne bobine Siemens en double T de 1855. Les machines Weston pour lumière sont caractérisées par l'armature, de forme

1. Ces mesures relevées par rapport à l'unité B. A. comme base, au lieu de l'ohm véritable, sont, par suite, de 1 1/2 pour 100 environ trop élevées.

cylindrique, dont l'âme est formée de disques ou rondelles de tôle garnis de dents en saillie entre lesquelles sont montées les bobines élémentaires. La carcasse de l'armature est représentée par la figure 106 ; on y voit également l'un des disques dont elle est for-

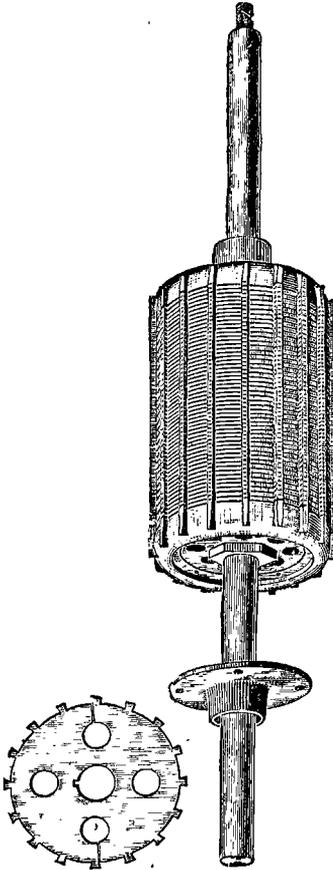


FIG. 106. — Ane de l'armature Weston.

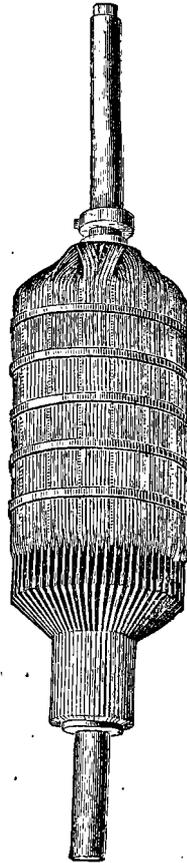


FIG. 107. — Armature Weston.

mée. La figure 107 reproduit l'armature complète. M. Weston a récemment adopté pour son armature un mode d'enroulement en deux circuits, grâce auquel un accident arrivant à une section ne met pas la machine absolument hors de service.

Les dernières machines Weston ont une forme très ramassée et présentent un grand nombre d'améliorations sur les premiers types. Dans ces machines, les pièces polaires sont, comme

on peut le voir dans la figure 108, formées de lames de fer destinées à éliminer les courants parasites et l'échauffement qui en résulte.

Suivant les renseignements les plus récents, M. Weston est arrivé à augmenter assez l'intensité du champ magnétique pour pouvoir réduire, dans une proportion considérable, le nombre de tours de fil sur l'armature. Cette armature a un collecteur en 24 parties et ses vingt-quatre sections n'ont *chacune qu'un seul tour* de très gros fil. La résistance de l'armature est par suite extrê-

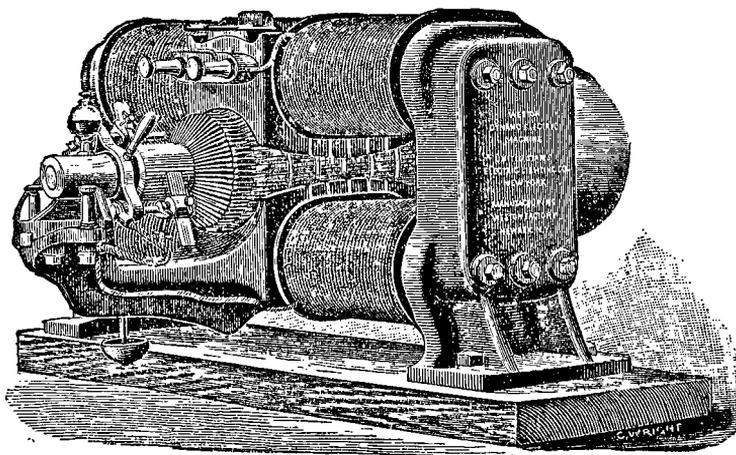


FIG. 108. — Machine Weston.

mement faible et pratiquement négligeable. Comme conséquence de ce très petit nombre de spires, la torsion du champ magnétique sous l'action du courant circulant dans l'armature est extrêmement réduite, et, en raison de la très faible résistance intérieure, la différence de potentiel aux bornes est, à vitesse constante, pratiquement constante. Cette machine, quoique non montée en *compound*, par le seul fait de sa résistance intérieure *nulle*, est auto-régulatrice ; elle permet, d'après M. le professeur Anthony, de supprimer d'un coup 99 lampes sur 100, et de n'en laisser brûler qu'une seule. La résistance de l'armature est inappréciable comparativement à celle des cent lampes en dérivation, c'est-à-dire par rapport à un demi-ohm.

Machine Newton. — L'armature de cette machine¹ est tout à fait analogue comme construction à celle de Weston; toutefois les disques sont en fonte et l'enroulement en est absolument différent. Elle ne comporte que huit circuits formés chacun de cinquante-six tours de fil réunis parallèlement, et les huit circuits sont de plus couplés en quatre, deux à deux. Les connexions sont absolument différentes de celles de la précédente et ressemblent beaucoup plus à celles de l'anneau Brush. Il y a deux commutateurs à sections obliques et chaque balai appuie sur deux d'entre elles.

Machine Elphinstone-Vincent. — Dans la machine Elphinstone-Vincent on trouve une armature cylindrique d'un genre un peu

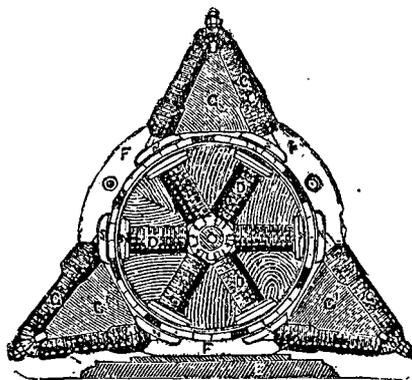


FIG. 109. — Machine Elphinstone-Vincent (section).

spécial; les bobines élémentaires s'étendent séparément sur la surface d'un tambour creux en papier mâché dont elles épousent la forme. Le champ magnétique est complexe; il est constitué, comme l'indique la figure 109, par six pôles externes et six pôles internes dont la proximité respective lui donne une grande intensité. Les sections de l'armature de cette machine sont roulées séparément en forme de parallélogrammes analogues à celui représenté par la figure 110; elles sont ensuite montées sur la périphérie du cylindre en papier mâché qui tourne lui-même entre les champs magnétiques externe et interne dont les pôles se ren-

1. *Electrical Review*, 1883, t. X, p. 430.

forcent mutuellement. Dans les machines les plus récentes, les parallélogrammes de fil sont disposés de telle sorte que leurs extrémités en chevauchement dépassent les extrémités des surfaces polaires des électro-aimants qui peuvent ainsi approcher très près de la surface du cylindre mobile. Les bobines en forme de parallélogrammes peuvent être reliées entre elles de manière à fonctionner comme trois machines et à alimenter trois paires de balais; ceux-ci peuvent à leur tour être réunis soit en série, soit en dérivation, ou être employés à alimenter trois

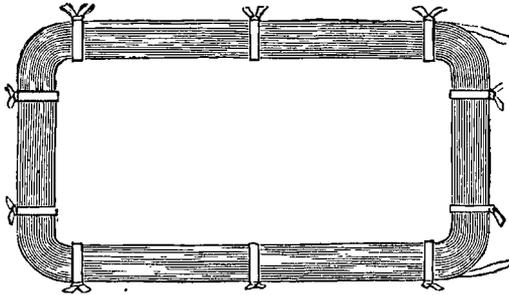


FIG. 110. — Bobine élémentaire d'une machine Elphinstone-Vincent.

circuits séparés. Une vue générale de la machine « E » (fig. 111) montre la disposition de ses divers organes et le montage des balais. Dans les dernières machines, les segments du collecteur sont transversalement reliés à l'intérieur de manière à nécessiter seulement deux balais au lieu de six.

Une machine tout à fait semblable, avec armature en forme de cylindre creux, a été imaginée par M. Zipernowsky¹; — et une autre, à armature presque identique, par M. Thury; on en trouvera la description dans *La Lumière électrique*².

Machine Houston-Thomson. — La machine conçue par MM. les professeurs Edwin J. Houston et Elihu Thomson de Philadelphie, bien que non encore introduite en Europe, est employée sur une grande échelle aux États-Unis. Son armature est unique parmi les armatures en forme de tambour. Elle n'a que trois bobines élé-

1. DREDGE, *Electric illumination*, p. 10.

2. *La Lumière électrique*, t. XII; p. 212.

mentaires formées chacune d'un grand nombre de spires. Ces bobines sont distribuées à la surface d'une sphère en fer creuse. Les extrémités internes des trois fils sont simplement réunies entre elles.

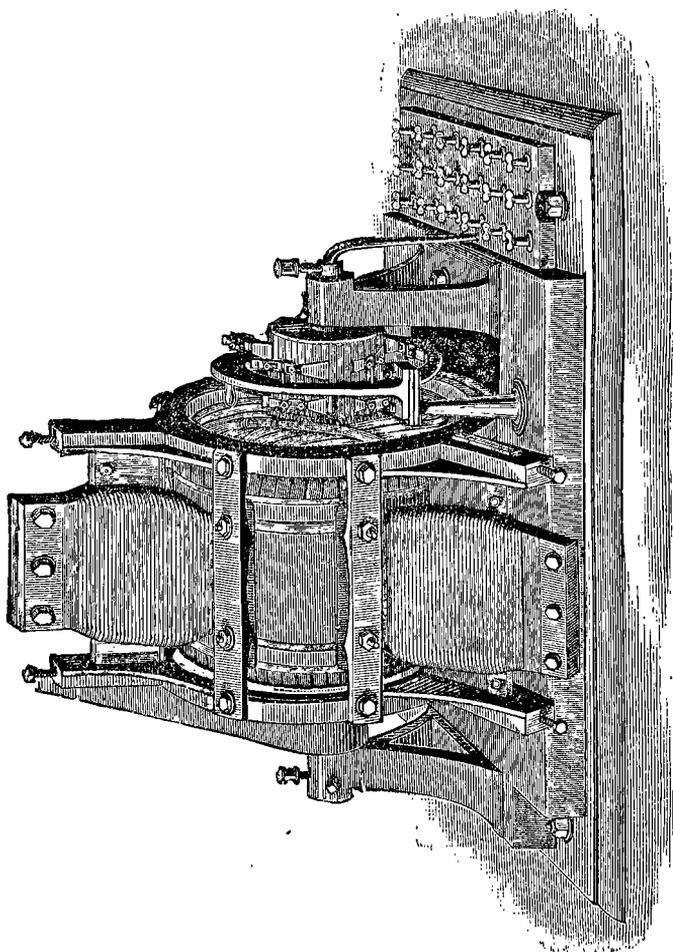


Fig. 111. — Machine Elphinstone-Vincent.

Les trois extrémités externes sont reliées chacune à un segment d'un commutateur en 3 parties. La machine a deux paires de balais, une paire supérieure et une paire inférieure, qui se règlent magnétiquement d'eux-mêmes. Les segments du commutateur sont séparés par des intervalles d'air de 8 millimètres de large. Les électro-aimants sont montés à droite et à gauche de l'armature

sphérique et formés de deux hémisphères creux concentriques constituant entre eux un champ magnétique très intense. L'arbre est un tube d'acier, et un petit ventilateur mobile entraîne un courant d'air à travers les espaces libres du commutateur. On prétend qu'il n'y a pas d'étincelles et que la tendance à l'échauffement est très faible dans ces machines extraordinaires dont l'une peut entretenir un courant de 9,6 ampères à travers une série de soixante-trois lampes à arc.

Machine Mouse-Mill (cage d'écureuil) de Thomson. — Une autre machine de conception tout à fait spéciale, quoiqu'à appartenant au

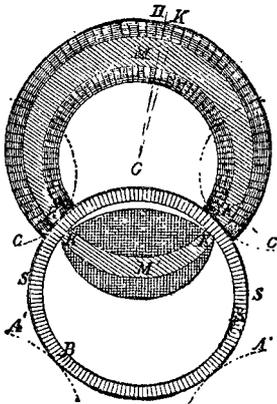


FIG. 112. — Machine Mouse-Mill de Thomson.

type des armatures en forme de tambour, mérite une attention particulière; c'est la dynamo « mouse-mill » de Sir W. Thomson, dont la figure 112 donne le diagramme. Plusieurs organes de cette machine — tels que la forme de son système inducteur et des bobines dont il est formé, ainsi que ses électro-aimants internes — ont été signalés dans d'autres chapitres. L'armature est constituée par un cylindre creux SS formé de barres de cuivre parallèles, disposées comme les barreaux d'une cage d'écureuil ou de souris blanche (d'où le nom de la machine « moulin à souris »).

Ces barres sont isolées l'une de l'autre, mais reliées toutes ensemble par une de leurs extrémités; à leur autre extrémité, elles font l'office de lames de collecteur et livrent passage aux courants développés en elles qui vont aux « balais » constitués ici par des disques élastiques et mobiles en cuivre représentés par les cercles pointillés CC dans la figure. L'armature, en forme de barillet creux renfermant à l'intérieur des électro-aimants fixes, ne peut pas tourner autour d'un axe; elle est entraînée par des galets de friction A'A' qui la font tourner. En dépit de son originalité, cette forme de machine ne paraît pas posséder de grandes qualités pratiques.

CHAPITRE VIII

TYPES DE MACHINES

DYNAMOS DE LA CLASSE II

Les dynamos de la seconde catégorie comportent des bobines parcourant d'un mouvement circulaire différentes parties d'un champ magnétique dont l'intensité varie suivant les régions, ou celles d'un champ magnétique dans les diverses parties duquel les lignes de force sont de sens opposés. La figure 13 (p. 13) indique sommairement le principe de ces machines; nous allons en examiner maintenant la réalisation pratique.

Machine de Pixii. — Dans la première machine de Pixii, une seule paire de bobines était disposée de manière à traverser ainsi diverses parties du champ où l'induction magnétique était successivement de sens contraire. Une machine de ce genre donne, en conséquence, des courants alternatifs si un commutateur fixé sur l'arbre ne vient pas les redresser.

Machine Niaudet. — La machine de Niaudet, qui peut être regardée comme une machine de Pixii composée, dont les bobines élémentaires de l'armature sont reliées en un circuit continu comme celles de Siemens et de Gramme, est munie d'un collecteur radial au lieu du collecteur cylindrique des précédentes.

Machine Wallace-Farmer. — La dynamo de Wallace-Farmer réalise très approximativement la condition du champ magnétique

représenté par la figure 113; elle comporte, comme l'indique la figure 113, à la partie supérieure une paire de pôles disposés de telle sorte que le pôle N. fait face au pôle S., et à la partie inférieure une autre paire où le pôle S. est en regard du pôle N. Les bobines fixées sur un disque sont entraînées circulairement en conservant leurs axes parallèles à l'axe de rotation : il y a ainsi deux jeux de bobines sur les faces opposées de deux disques de fer accolés l'un à l'autre. Ces bobines sont reliées (voir la fig. 114) exactement comme dans la machine de Niaudet, et chaque disque possède un collecteur spécial. Chacune des lames du collecteur est d'ailleurs reliée, comme dans les machines de Pacinotti, Gramme, Siemens, etc.

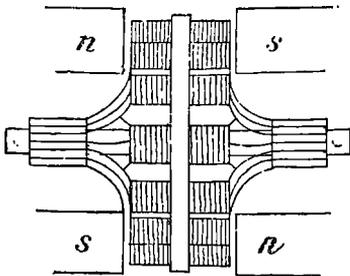


FIG. 113. — Machine Wallace-Farmer.

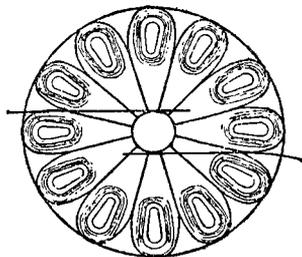


FIG. 114. — Machine Wallace-Farmer.

avec l'extrémité d'une bobine et le commencement de la suivante. En réalité, la machine Wallace-Farmer est simplement une machine double de Niaudet à collecteurs cylindriques. Les disques en fer, d'une seule pièce, offrent un grave inconvénient dans la pratique : ils s'échauffent très rapidement sous l'influence de courants parasites internes qui y prennent naissance dans la rotation. La dépense d'énergie qui en résulte diminue le rendement de la machine.

Machines Lane-Fox, Brockie, Leipner. — Plusieurs autres inventeurs parmi lesquels je citerai Lane-Fox, Brockie et Leipner ont cherché à réaliser des machines analogues. Mais les armatures de ce genre paraissent présenter quelque difficulté de construction; la cause pourrait bien en être dans ce fait que, en raison des polarités semblables induites dans deux sections adjacentes, les

courants qui parcourent les fils de ces sections marchent en sens contraire dans l'espace situé entre les noyaux adjacents; peut-être faut-il aussi l'attribuer aux renversements subits d'aimantation dans les noyaux séparés et aux inductions nuisibles internes qui en résultent.

Machine Hefner-Alteneck. — M. von Hefner-Alteneck a réussi cependant à convertir en machine à courant continu la machine Siemens à courants alternatifs ci-après décrite. Il a imaginé à cet effet¹ d'employer une armature en forme de disque composée d'un nombre de bobines différent, à deux ou un nombre pair près, de celui des bobines du champ magnétique; il a en outre adopté un collecteur multiple à lames avec connexions transversales assez compliquées.

Machine Hopkinson et Muirhead. — La machine Hopkinson et Muirhead, qu'on a vue à l'Exposition de Paris en 1881, présente une forme mieux raisonnée d'armature-disque. Le disque massif en fer destiné à supporter les bobines est remplacé par un disque formé d'une bandelette de fer enroulée en spirale autour d'un noyau en bois; les bobines, de forme à peu près rectangulaire et aplaties, sont montées sur les faces du disque ainsi constitué. Les bobines élémentaires sont reliées les unes aux autres et à un collecteur du type ordinaire. L'armature de la machine Hopkinson et Muirhead est constituée de bandes de cuivre au lieu de fil ordinaire.

Machine Ball ou Disque d'Arago. — La dynamo de Ball (dite machine à « disque d'Arago ») lui ressemble à beaucoup d'égards, mais les bobines de l'armature sont dépourvues de noyaux de fer.

Machine Ayrton et Perry. — Une autre machine appartenant à la même catégorie est la machine « à enroulement oblique » imaginée par les professeurs Ayrton et Perry (fig. 115); cette machine, qu'il ne faut pas confondre avec une machine plus ancienne du

1. Voir *L'Électricien*, 1881, t. I, p. 278.

professeur Perry dont les bobines étaient montées obliquement sur un noyau en bronze phosphoreux, est une machine à 4 pôles dont l'anneau traverse successivement quatre régions; les lignes de force passent de droite à gauche dans deux de ces régions, et

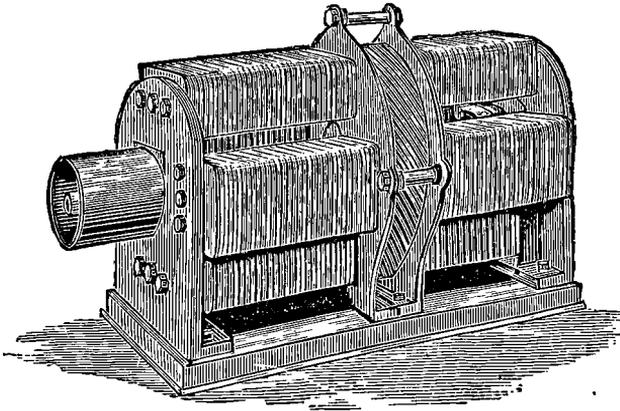


Fig. 115. — Machine Ayrton et Perry à enroulement oblique.

de gauche à droite dans les deux régions intermédiaires. L'anneau est en bois et sectionné par des pièces de fer, comme on le voit en plan et en coupe dans les figures 116 et 117, et le fil est enroulé de

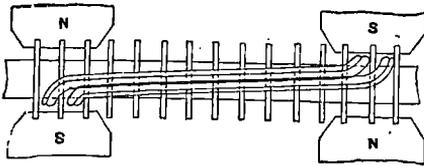


Fig. 116.

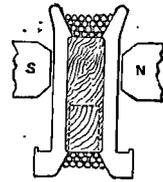


Fig. 117.

Plan et coupe de l'enroulement de l'Armature Ayrton et Perry.

telle sorte que chaque spire longeant radialement l'une des faces de l'anneau, passe ensuite obliquement sur sa périphérie en décrivant un arc hélicoïdal de 90 degrés environ, pour revenir radialement le long de l'autre face, et de là obliquement encore à la face de départ. Les bobines élémentaires chevauchent l'une sur l'autre. Elles sont reliées entre elles et au collecteur suivant le mode ordinaire, mais il y a quatre balais.

Machine Elphinstone-Vincent. — MM. Elphinstone et Vincent ont imaginé une dynamo à armature-disque tout à fait analogue.

Machine Edison. — Une autre machine appartenant à la même

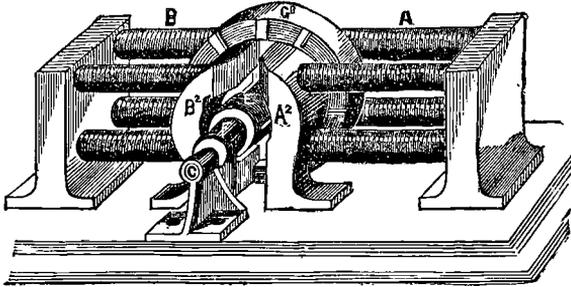


FIG. 118. — Dynamo à disque d'Edison.

catégorie et possédant une armature-disque est due à l'infatigable M. Edison (fig. 118) qui a construit une armature formée de barres radiales reliées à leurs extrémités extérieures par des cercles con-

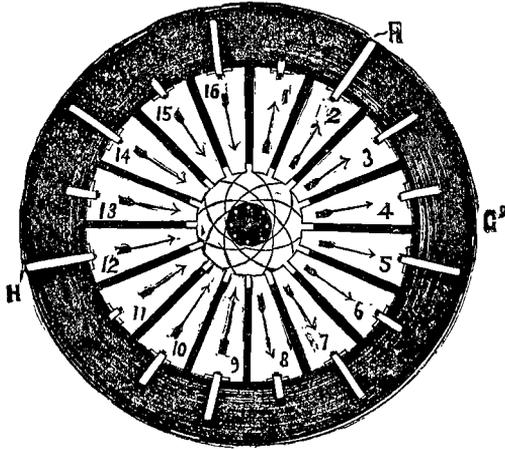


FIG. 119. — Armature de la dynamo à disque d'Edison.

centriques et à l'intérieur par des plateaux ou rondelles. La disposition générale du disque est indiquée dans la figure 119. Chaque barre radiale communique à travers l'un des cercles avec celle qui lui est opposée; et le disque ainsi formé est mis en mouvement

entre les flasques ou pièces polaires A^1 , A^2 et B^1 , B^2 de puissants électro-aimants très rapprochés l'un de l'autre qui constituent par suite un champ magnétique extrêmement intense. La figure 120 re-

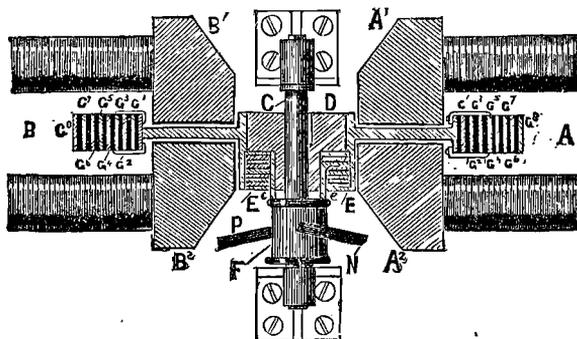


FIG. 120. — Plan de la dynamo à disque d'Edison.

présente la machine en plan. Je n'ai pas entendu dire qu'aucune de ces dynamos à disque ait encore reçu la sanction de la pratique.

Machine de Sir W. Thomson. — Sir W. Thomson a inventé un autre type de dynamo à disque. Ici l'armature est une sorte de

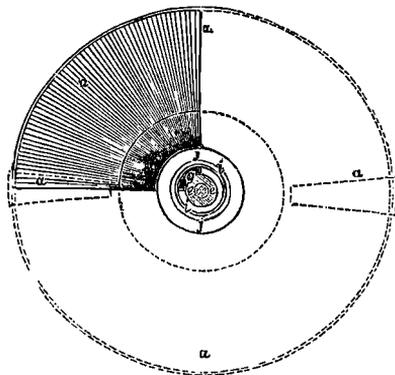


FIG. 121. — Armature de la dynamo-poulie de Thomson.

poulie plate, très analogue à une roue de vélocipède. Elle est représentée en a dans les figures 121, 122 et 123.

Les bras radiaux ou les rais de la poulie, dans lesquels les courants sont induits, sont tous reliés par leurs extrémités extérieures

à un limbe de cuivre; mais leurs extrémités internes sont soigneusement isolées et reliées chacune à un segment de collecteur ou

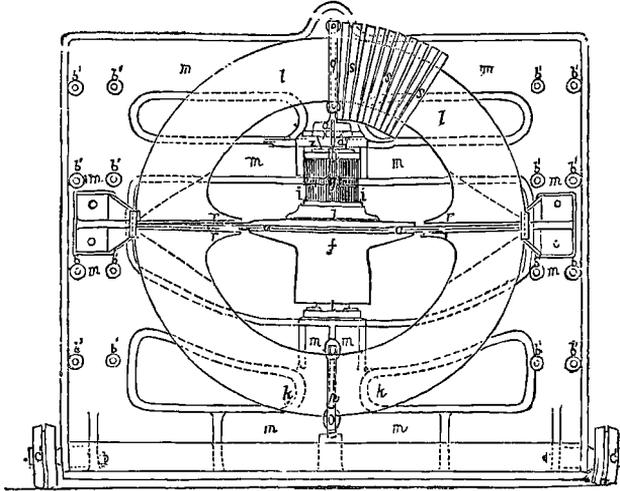


FIG. 122. — Dynamo-poulie de Thomson (vue de face).

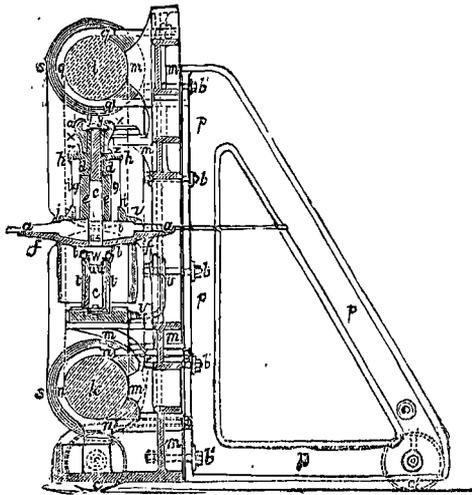


FIG. 123. — Dynamo-poulie de Thomson (vue de bout).

commutateur *g*. Comme dans la machine à disque d'Edison, le disque de celle-ci tourne entre les pôles d'électro-aimants très puissants qui, dans le cas de la machine de Sir W. Thomson, sont de

forme semi-circulaire. Sir W. Thomson fait en outre mouvoir son armature autour d'un axe vertical; elle tourne en pointes comme dans son gyrostat. Cette machine ne paraît malheureusement pas donner pratiquement ce qu'on en espérait. Son mode de construction implique une très grande vitesse, sans quoi la force électromotrice est faible. Si les barres radiales, au lieu d'être toutes réunies à un seul limbe, étaient reliées, par des limbes isolés à chevauchement, chacune à la voisine de celle qui lui est diamétralement opposée, et si, revenant au moyeu, la connexion retournait ensuite non pas au cercle immédiatement voisin du limbe extérieur mais au suivant, le même mode de connexion étant d'ailleurs pratiqué sur tout le pourtour, tous les rais se trouveraient alors en circuit, ce qui permettrait d'obtenir une force électromotrice beaucoup plus élevée. Je ne sache pas qu'on ait encore essayé aucun disque présentant ce mode de connexions.

Machines à Courants alternatifs.

Les machines de beaucoup les plus importantes dans cette seconde classe sont celles communément connues sous le nom de *machines à courants alternatifs*.

Machines de Stöhrer, Nollet, Holmes et de l'Alliance. — Ce genre de machine n'est pas nouveau; les machines de Stöhrer, Nollet, Holmes et celle dite de « l'Alliance », toutes à aimants permanents, en sont les premiers types.

Machine de Wilde. — Le type plus moderne, à électro-aimants, a été créé par Wilde en 1867. Le champ inducteur fixe se compose de deux bâtis verticaux portant chacun une couronne d'électro-aimants fixes, à noyaux de fer, disposés de telle sorte que leurs pôles libres soient opposés les uns aux autres; ces deux couronnes sont séparées par un espace suffisant pour laisser passer l'armature. Les pôles successifs sur chaque couronne sont alternativement N. et S., et un pôle N. sur l'une des couronnes est opposé à un pôle S. sur l'autre. Cette disposition est commune aux électro-aimants des

machines à courants alternatifs de Wilde et de Siemens, à la machine dite de Ferranti, et, sous certaines réserves, à celles de Lachaussée et de Gordon. L'armature, dans presque toutes les machines de ce type, est constituée par un *disque* portant à sa périphérie un certain nombre de bobines dont les axes sont parallèles à l'axe de rotation.

L'inspection de la figure 124 permet d'en mieux comprendre le

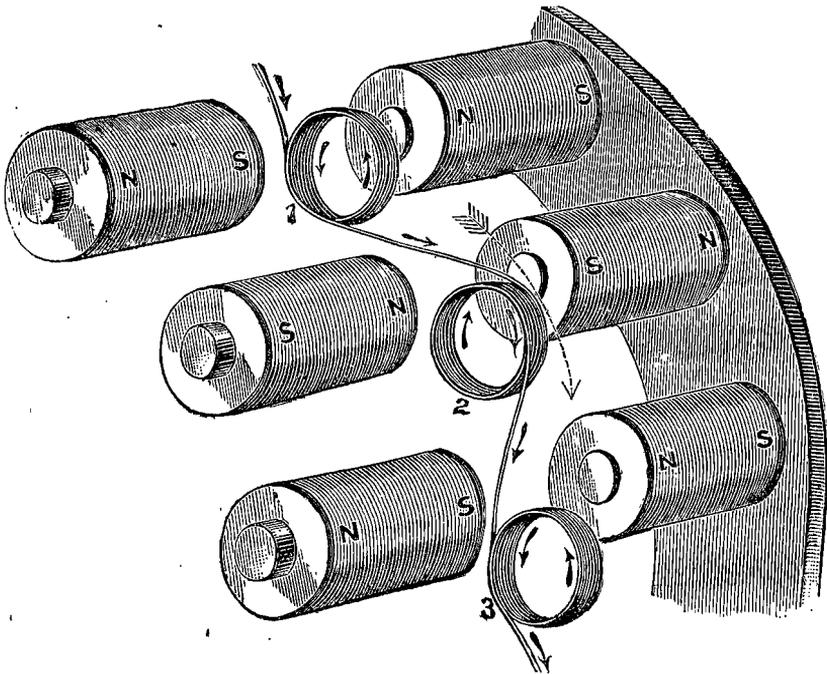


FIG. 124.

principe; elle donne une vue générale du montage. Du moment où les lignes de force sont dirigées en sens contraires entre les bobines fixes, qui sont alternativement S.-N., N.-S., comme nous l'avons indiqué ci-dessus, les bobines mobiles sont nécessairement parcourues par des courants alternatifs; les bobines successives de l'armature étant d'ailleurs parcourues par des courants de sens contraires, elles doivent être nécessairement reliées, comme l'indique la figure, de telle sorte que leurs actions respectives ne soient pas en opposition mutuelle.

Dans la machine de Wilde, les bobines de l'armature renferment des noyaux de fer; la machine est elle-même pourvue d'un commutateur basé sur le même principe que celui employé par Jacobi dans son fameux moteur de 1838, et formé de deux cylindres métalliques découpés comme des manchons d'embrayage, les saillies de l'un s'engageant dans les entailles de l'autre, de telle sorte que les balais, dans la rotation, font alternativement contact avec l'un et avec l'autre. Les balais sont, naturellement, fixés de manière à ne pas toucher en même temps la même partie. Wilde appliquait communément ce commutateur à un petit nombre de bobines mobiles, ou à l'une d'entre elles seulement, et utilisait le courant ainsi obtenu à la production du champ magnétique. Quant au courant principal, il n'était pas ainsi redressé, mais simplement recueilli par un collecteur formé de deux bagues reliées aux deux extrémités du circuit de l'armature et pressées chacune par un balai.

Machine Siemens. — MM. Siemens préfèrent employer une machine séparée à courant continu pour exciter les électro-aimants de leur machine dynamo à courants alternatifs (fig. 125). — Dans leur armature, les bobines sont généralement roulées sur des noyaux de bois et complètement dépourvues de fer, avantage considérable en ce qu'il évite l'échauffement résultant des aimantations et désaimantations successives. Dans certains types de ces machines, les bobines sont roulées individuellement entre deux flasques de maillechort perforées ou découpées en vue de la ventilation. Pour des courants de grande intensité, mais de faible force électromotrice, les bobines sont couplées en un ou plusieurs arcs parallèles, au lieu d'être réunies en série; dans d'autres types, à débit encore plus grand, le fil qui forme les bobines est remplacé par des bandelettes de cuivre isolées l'une de l'autre par un ruban de toile caoutchoutée; les connexions des bandelettes de cuivre avec les fils de sortie du courant sont soudées à l'argent. Dans la figure 125, on voit une petite machine à courant continu, du type vertical représenté page 144, fonctionnant comme excitatrice pour fournir les courants d'aimantation aux électro-aimants fixes de la machine à courants alternatifs.

Machine Lachaussée. — Dans une dynamo qui porte le nom de M. Lachaussée et n'est guère qu'une copie de la précédente, les bobines mobiles sont munies de noyaux de fer. Cette machine diffère de la machine Siemens uniquement en ce que le système in-

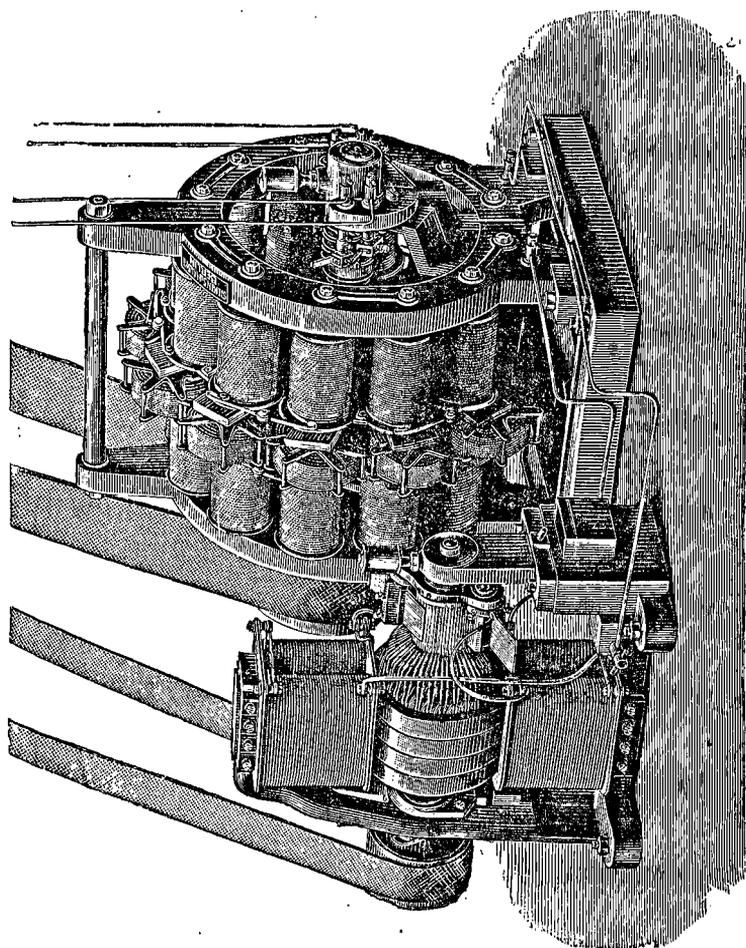


FIG. 125. — Machine Siemens à courants alternatifs avec son excitatrice.

ducteur est mobile, tandis que les bobines fixes, montées de part et d'autre sur des bâtis circulaires analogues aux précédents, constituent l'armature dans laquelle les courants sont induits. Une machine Gramme excite les inducteurs.

Machine Gordon. — La dynamo de Gordon, la plus grande qui

ait été construite jusqu'ici (fig. 126), est établie sur le même type que celle de Lachaussée, au moins comme lignes principales; elle comporte cependant d'importantes améliorations. En premier lieu, les armatures fixes sont constituées par des bobines en nombre double de celui des électro-aimants inducteurs mobiles; il y a de chaque côté du disque mobile 32 bobines, soit en tout 64 bobines

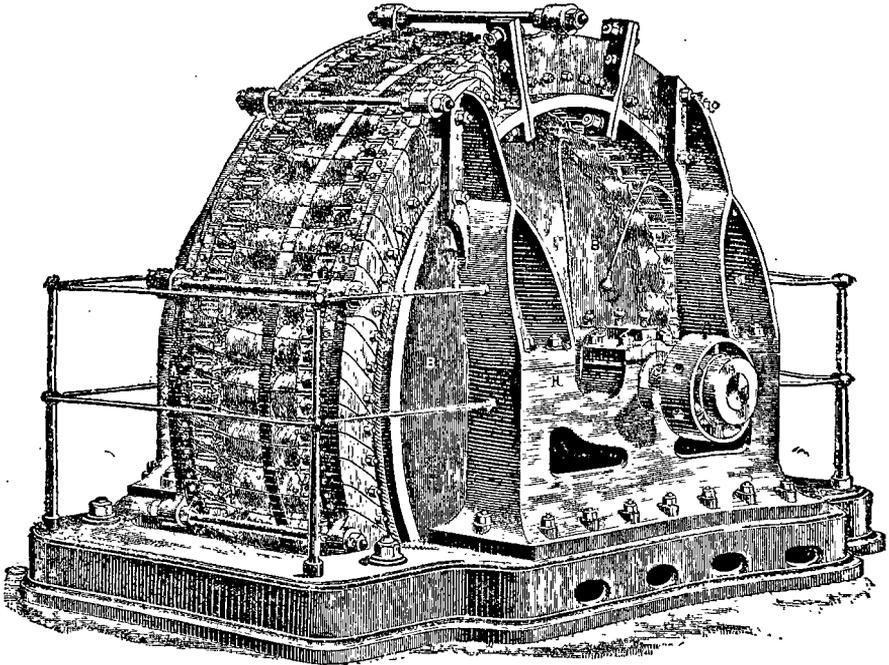


FIG. 126. — Machine Gordon.

mobiles; tandis que chacune des flasques en comporte 64, soit en tout 128 bobines fixes. Ces dernières sont de forme allongée, roulées sur des noyaux en tôle de chaudières recourbée en forme de V aigu, avec des joues de maillechort perforées dans le genre des bobines induites de Siemens. Cette disposition des bobines mobiles ayant une largeur angulaire double de celle des bobines fixes a pour but d'empêcher les bobines adjacentes de la série fixe d'agir par induction l'une sur l'autre au détriment de l'action générale. Les bobines alternées de la série fixe sont réunies ensemble en arcs parallèles, de manière à former deux circuits distincts susceptibles

d'alimenter des lampes, soit ensemble, soit séparément, et d'être couplés à volonté. On paraît avoir apporté un grand soin, dans la construction de cette énorme machine, à éviter la production des courants parasites, en disposant les noyaux, bâtis ou bobines, de telle sorte que toutes les parties métalliques de quelque étendue soient coupées ou divisées, dans leur structure, à angles droits par rapport à la direction des forces électromotrices induites¹.

Machine Lontin. — M. Lontin a inventé une machine à courants alternatifs à armature polaire. La figure 127 donne le diagramme

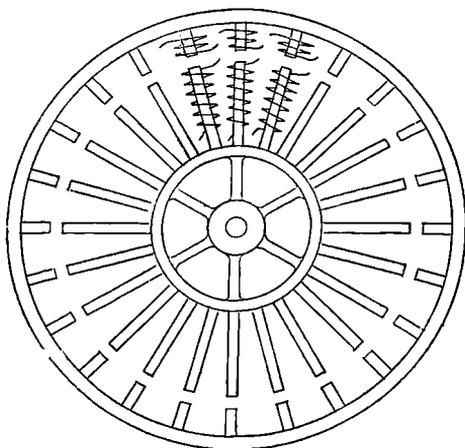


FIG. 127. — Diagramme du principe de la machine Lontin.

de la carcasse. Dans cette machine, le champ inducteur (excité séparément par un courant continu) était formé d'une série de pôles radiaux et il tournait à l'intérieur d'une autre série de bobines jouant le rôle d'armature fixe. Les figures 128 et 129 montrent le montage réel de la machine, y compris les balais amenant le courant exciteur au système inducteur mobile, ainsi que les bornes et commutateurs permettant de coupler à volonté les bobines élémentaires de l'armature. Cette machine, qui depuis longtemps a été mise de côté, présentait un certain nombre de défauts dont le moindre n'était pas la grande quantité de fer qu'elle contenait et où

1. Pour plus amples détails sur la machine Gordon, voir le *Practical Treatise on Electric Lighting* de M. Gordon (1884), p. 162.

se trouvaient induits tant de courants parasites que la machine avait une tendance très marquée à s'échauffer outre mesure. Il fallait, en réalité, dépenser plus d'énergie pour la faire tourner en circuit ouvert que pour lui faire alimenter son nombre maximum de lampes.

MM. de Méritens et Gramme ont employé, dans des machines à

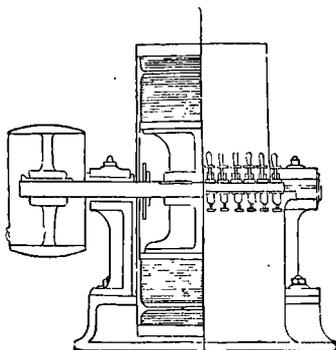


FIG. 128.

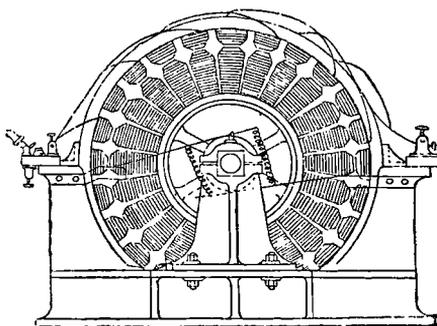


FIG. 129.

Machine à courants alternatifs de Lontin.

courants alternatifs, des armatures en anneau spécialement modifiées à cet effet.

Machine de Méritens. — Dans la machine de Méritens, un certain nombre d'aimants en acier sont montés autour de l'anneau de manière à présenter une couronne de pôles alternés. L'anneau lui-même est divisé en autant de sections qu'il y a de pôles externes, et les connexions de ces sections sont disposées de telle sorte que, si le courant induit parcourt une section dans le sens d'une hélice dextrorsum et la suivante dans le sens d'une hélice sinistrorsum (comme dans le cas où l'une des sections approche d'un pôle N. tandis que la suivante approche d'un pôle S.), l'ensemble des courants, à un instant quelconque, circule dans l'armature sans conflit, c'est-à-dire sans que ces courants marchent en opposition l'un avec l'autre.

Machine Gramme. — On trouve un anneau connecté d'une façon analogue dans un type de machine à courants alterna-

tifs imaginé par M. Gramme. Le système inducteur du type polaire rayonnant, comme dans la machine Lontin, tourne à l'intérieur de l'anneau et induit des courants alternatifs rapides dans ses sections qui sont ou bien roulées ou mieux encore reliées alternativement en hélices dextrorsum et sinistrorsum. La figure 130 représente un schéma de la machine Gramme à courants alternatifs. Il se produit, dans chaque section de l'anneau, un courant d'un certain sens par

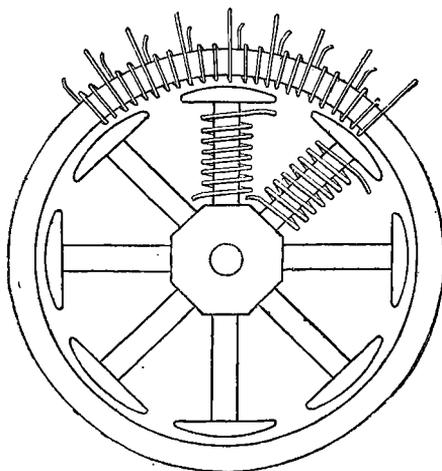


FIG. 130.

l'approche d'un pôle et un courant de sens contraire par l'éloignement de ce pôle.

Machine Mechwart-Zipernowsky. — MM. Ganz, de Buda-Pesth, ont présenté à la dernière Exposition de Vienne une très grande machine à courants alternatifs qui a beaucoup de points communs avec celle de M. Lontin. Elle était capable d'alimenter 1200 lampes Swan de 20 candles (16 bougies) chacune. Cette machine qui, à certains égards, ressemblait à celle de Gordon, était construite suivant le système Mechwart-Zipernowsky. Les trente-six bobines des électro-aimants étaient montées concentriquement sur un bâti en fer et tournaient à l'intérieur d'un cercle externe formé de trente-six bobines induites. La couronne de bobines inductrices constituait par le fait le volant de la machine compound à haute pression qui

conduisait la machine et son excitatrice. La partie mobile avait 2,5 mètres de diamètre. Une des particularités caractéristiques de cette machine était que l'une quelconque des bobines, induites ou inductrices, pouvait s'enlever latéralement à la machine en cas de nécessité. Tout le volant pouvait être ainsi démonté par un seul homme en quelques minutes. On prétend que son rendement électrique était de 85 pour 100.

Machine Ferranti-Thomson. — Une autre machine dynamo à courants alternatifs, identique à bien des égards à la machine

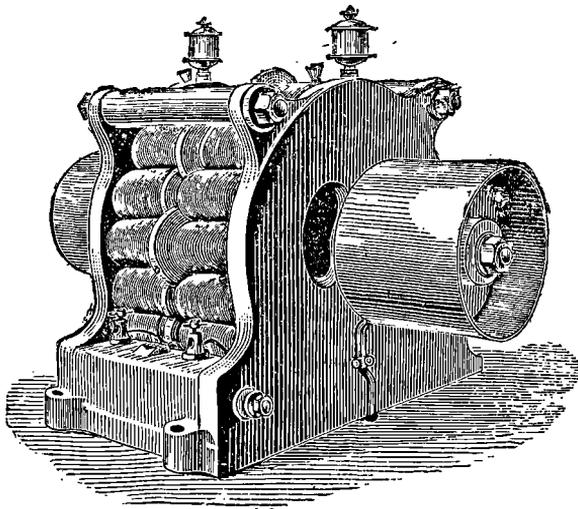


FIG. 131. — Machine Ferranti-Thomson (dite à mille lumières).

Siemens à courants alternatifs, a été produite il y a peu de temps sous le nom de machine Ferranti. Elle est représentée dans sa forme la plus récente par la figure 131. Comme dans les machines de Wilde et de Siemens, les électro-aimants sont disposés en deux couronnes à pôles opposés. La différence réside dans l'armature, qui, à l'instar de celle de Siemens, ne renferme pas de fer dans ses bobines; mais qui, au lieu d'être constituée, comme cette dernière, par des bobines roulées sur des noyaux en bois, est formée de bandes de cuivre contournées en zigzags successifs. Elle comporte 8 boucles en zigzags (comme l'indique la figure 132, qui représente

la moitié seulement de la disposition), opposées à 16 électro-aimants de chaque côté; de telle sorte que, comme dans la machine Gordon, les parties mobiles ont une largeur angulaire double de celle des parties fixes. L'aspect extérieur de la machine (fig. 131)

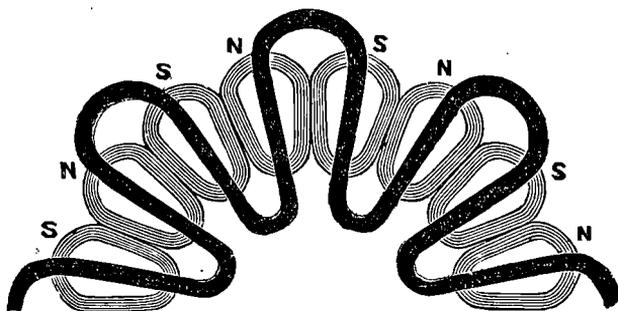


FIG. 132. — Diagramme de la machine à courants alternatifs de Ferranti.

est tout à fait analogue à celui de la machine Siemens (fig. 125), comme on peut le voir en comparant les deux figures. L'avantage de l'armature à bandes de cuivre en zigzags réside dans la simpli-

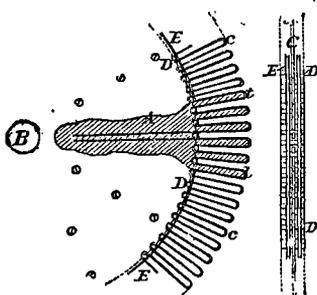


FIG. 133. — Diagramme de l'enroulement en zigzags de Sir W. Thomson pour armature de machine à courants alternatifs.

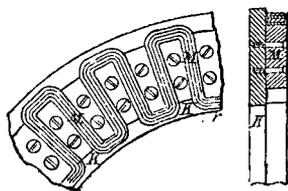


FIG. 134. — Électro-aimants proposés par Sir W. Thomson.

cité de la construction. — Sir W. Thomson, qui est l'un des inventeurs de ce genre d'armature, avait primitivement proposé d'enrouler les bandes de cuivre entre les dents d'un engrenage en bois, comme l'indique la figure 133, tirée des dessins de son brevet anglais du mois de décembre 1881. Il avait également proposé d'employer comme électro-aimants une forme d'électros analogue

à celle connue sous le nom de Roberts, aussi employée par Joule, dans laquelle les fils conduisant le courant exciteur contournent

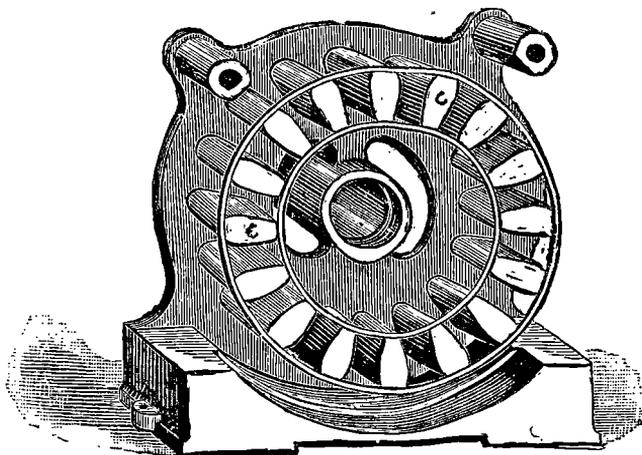


FIG. 133. — Demi-carresse de la machine Ferranti.

en zigzags des blocs de fer en saillie sur un bâti en fer. La figure 134 montre cette disposition relevée d'après la spécification du brevet ;

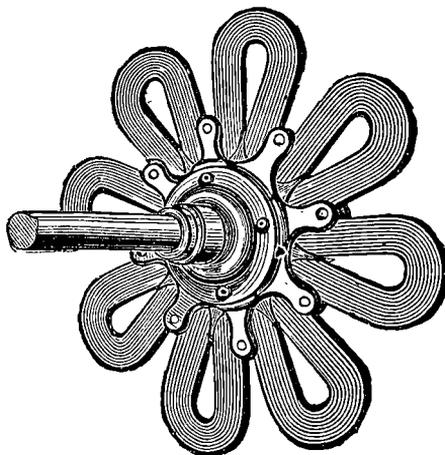


FIG. 136. — Armature de la machine Ferranti.

les bandelettes de cuivre contournent, comme on le voit, des saillies en fer fixées par des vis sur un bâti de fonte. Le bâti de la

machine est fondue en deux pièces réunies ensuite à l'aide de boulons. La figure 135 montre l'une des moitiés de la carcasse de la machine avec sa couronne de noyaux d'électro-aimants C en saillie destinés à recevoir les bobines des électro-aimants. L'armature, primitivement formée d'une seule bande de cuivre en zigzags, a reçu ultérieurement la forme indiquée par la figure 136 où l'on

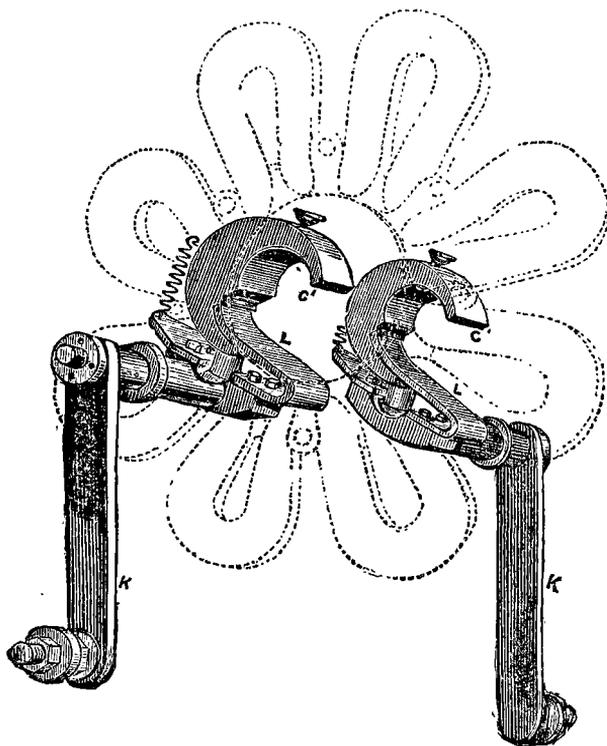


FIG. 137. — Collecteurs de la machine Ferranti.

peut voir que les circonvolutions sont multipliées et maintenues en place par des boulons traversant une étoile en bronze qui sert également à faire connexion entre l'un des deux collecteurs et l'une des bandes de cuivre en zigzags. Il y a, en réalité, dans l'armature trois circuits complets de bandes de cuivre reliés en arc multiple. Ils commencent à trois des quatre boulons alternés de l'étoile, et, s'enveloppant mutuellement sur tout le pourtour de l'armature, ils viennent tous se réunir à une seconde étoile intérieure qui com-

munique avec le second collecteur. Chaque bande fait dix tours complets en zigzags, de sorte qu'il y a trente couches, toutes bien isolées les unes des autres par des bandes de fibre vulcanisée. Cette armature a $0^m,76$ de diamètre et à peu près $0^m,013$ d'épaisseur aux circonvolutions extérieures, ce qui permet de rapprocher beaucoup les pôles opposés des électro-aimants et de constituer un champ magnétique très puissant. L'armature entière ne pèse que 43,5 kilog. La partie la plus curieuse de la machine est toutefois la disposition adoptée pour conduire les courants au circuit extérieur. L'arbre porte de chaque côté de l'armature une bague collectrice isolée, en bronze, à laquelle sont respectivement reliées les étoiles susmentionnées. Au lieu de balais, des pièces massives de métal, représentées en *CC'* (fig. 137), sont employées pour recueillir le courant. Ces collecteurs embrassent les bagues collectrices sur 180 degrés environ de leur périphérie. Ils sont fixés sur des articulations universelles, et des ressorts les empêchent de tourner. Des bandes de cuivre les relient aux bornes de la machine. Le système graisseur des portées a été étudié avec un soin tout particulier. La machine marche normalement à une vitesse de 1400 tours et pèse 1500 kilog. environ. M. Ferranti a également étudié une machine à petite vitesse qui ne tourne qu'à 300 tours à la minute et alimente 500 lampes. Dans une autre machine récente, des contacts à mercure renfermés dans des godets en acier isolés remplacent les collecteurs ci-dessus décrits.

On ne peut encore, dans l'état actuel de la science électrique, se prononcer, si ce n'est peut-être au point de vue du coût de premier établissement, sur la valeur comparative des machines à courants alternatifs et des machines à courant continu. Pour un système général de distribution, où il peut être avantageux d'employer plusieurs dynamos, de même que pour l'alimentation de moteurs, les machines à courants alternatifs sont absolument hors de question. En effet, si la distribution doit être faite « en dérivation » par des branchements de fils principaux et secondaires, on se trouve forcément en présence de cette difficulté que les courants alternatifs ne se distribuent pas selon la résistance du circuit, mais suivant le rapport de la self-induction à la résistance;

et si la distribution doit être « en série », la difficulté provient de ce que deux machines à courants alternatifs ne peuvent pas être couplées en série pour alimenter le circuit avec la force électromotrice énorme exigée dans ce cas; si on les couple ainsi, on trouve, en effet, qu'elles travaillent en opposition. Le risque de danger pour les individus est aussi plus considérable avec les machines à courants alternatifs¹.

Les machines à courants alternatifs sont employées pour l'alimentation de lampes à arc « en série » par MM. Siemens, Jablochkoff et Lontin. Elles sont également appliquées à la distribution des courants à des lampes à incandescence « en dérivation » par MM. Siemens, Gordon, Ferranti (compagnie Hammond), et Ziperowsky (Ganz et C^{ie}). Dans ces différents cas, on obtient la régulation en faisant varier l'intensité du courant d'excitation fourni aux électro-aimants; au point de vue pratique, ce mode de réglage exige la manœuvre à la main d'un régulateur suivant les besoins de l'éclairage².

1. Cette réputation faite aux machines à courants alternatifs tient surtout à ce qu'elles ont, jusqu'à ces derniers temps, été employées à alimenter des foyers en série, disposition exigeant une différence de potentiel élevée; leur application à l'éclairage par incandescence en dérivation qui ne demande pas plus de 50 ou 100 volts est absolument inoffensive. (N. du T.)

2. Toutefois dans les dernières machines Siemens à courants alternatifs pour lampes à incandescence en dérivation, la résistance extrêmement faible de l'armature, relativement à celle du circuit extérieur, permet une régulation *automatique* du courant dans des limites pratiques très étendues. (N. du T.)

CHAPITRE IX

TYPES DE MACHINES

DYNAMOS DE LA CLASSE III

La troisième classe de dynamos comprend les machines dans lesquelles la rotation d'un conducteur détermine une augmentation continue du nombre de lignes de force coupé, grâce à une disposition permettant à une partie du conducteur de glisser sur l'aimant ou de tourner autour de lui.

Roue de Barlow ou de Sturgeon. — La première machine méritant à quelque titre le nom de dynamo appartenait, en réalité, à

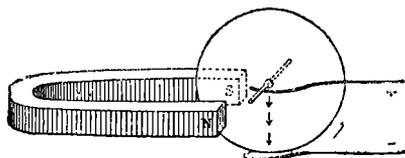


FIG. 138. — Roue de Barlow.

cette catégorie. Barlow et Sturgeon avaient montré qu'un disque de cuivre, placé entre les pôles d'un aimant (fig. 138), se met en mouvement dans le champ magnétique lorsqu'il est traversé par un courant électrique allant de l'axe à la périphérie où se trouve un contact à glissement.

Machine-Disque de Faraday. — Faraday, en 1831, montra que la rotation, par l'action d'une force mécanique, d'un disque analo-

gue entre les pôles d'un aimant produisait des courants continus. Il recueillait ces courants au moyen de ressorts de cuivre ou de plomb dont l'un était en contact avec l'axe (fig. 139), et l'autre avec la périphérie amalgamée. « Il était ainsi en mesure de construire une nouvelle machine électrique », suivant ses propres expressions¹, et « se trouvait avoir démontré la production d'un courant permanent (c'est-à-dire continu) d'électricité avec des aimants ordinaires ». Mais Faraday ne s'en tint pas aux aimants ordinaires : il alla jusqu'à appliquer le principe de l'excitation séparée à son champ magnétique. « On pouvait, disait-il, obtenir les mêmes effets avec des *pôles électro-magné*

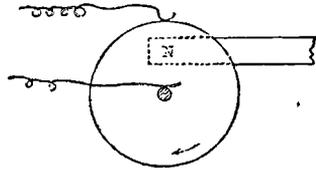


FIG. 139
Dynamo à disque de Faraday.

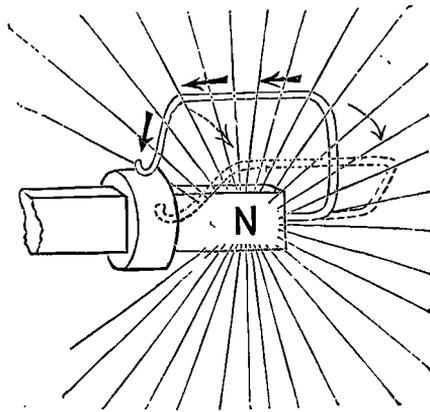


FIG. 140. — Rotation d'un conducteur autour d'un pôle d'aimant dont il coupe les lignes de force.

tiques, résultant de l'emploi d'hélices ou de spirales de cuivre, munies ou non de noyaux de fer. Le sens du mouvement était exactement le même, mais l'action était beaucoup plus énergique quand on employait des noyaux de fer que sans noyaux². » L'invention de la machine dynamo remonte donc à 1831, et Faraday en a découvert le principe, tout en laissant recueillir par d'autres

1. *Recherches expérimentales*, § 83.

2. *Recherches expérimentales*, § 111.

les fruits de son admirable découverte¹. Une machine de ce genre n'est cependant pas pratique pour diverses raisons : la friction à la périphérie n'est admissible que sur une petite échelle ; la disposition du champ magnétique détermine d'ailleurs nécessairement des courants parasites et coûteux dans le disque, qui, même fendu radialement, ne constitue pas une forme d'armature appropriée à un champ magnétique aussi limité.

La figure 140 indique une autre disposition permettant de faire couper les lignes de force d'une façon continue ; un conducteur tourne ici, en glissant, autour d'un pôle d'aimant. Faraday a même obtenu des courants continus en faisant tourner un aimant muni à son centre d'une connexion à glissement, d'où partait un conducteur extérieur tournant autour de lui et faisant contact avec les pivots qui soutenaient l'aimant.

Machine de Varley. — M. S. Alfred Varley a imaginé, vers 1862, une disposition analogue. Il a fait tourner un aimant en fer dans un bâti vertical au centre duquel se trouvait une connexion au mercure. Le courant qui s'écoulait des deux extrémités de l'aimant vers le centre faisait retour à la machine et traversait des bobines entourant les pôles de l'aimant mobile. M. Varley avait ainsi devancé le principe de l'auto-excitation, de date plus récente. Il avait également proposé l'emploi d'un électro-aimant extérieur pour augmenter l'action produite.

Machine « unipolaire » de Siemens. — Tout récemment, MM. Siemens et Halske ont appliqué le même principe en construisant leur machine dite « unipolaire² », représentée dans la figure 141.

1. « J'ai néanmoins plutôt cherché », écrit-il dans ses *Recherches expérimentales*, § 158, « à découvrir des faits nouveaux et des relations nouvelles concernant l'induction magnéto-électrique, qu'à tirer meilleur parti des résultats déjà acquis, persuadé que ces derniers atteindront après moi leur plein développement. » Il est difficile de trouver dans aucune page de la science des lignes plus profondes, plus prophétiques et d'un caractère plus philosophique que ces mots par lesquels Faraday termine cette section de ses remarquables recherches.

2. L'expression n'est pas exacte, car la machine a deux pôles. Mais son nom est dérivé du terme « induction unipolaire » que les électriciens du continent donnent à l'induction de courants dans les conditions dont nous nous occupons en ce moment, c'est-à-dire quand les lignes de force sont coupées d'une façon continue. Cette expression ne me paraît pas devoir être adoptée ; elle peut induire inutilement en erreur.

Cette remarquable dynamo comporte deux cylindres de cuivre fendus longitudinalement en vue d'éviter les courants parasites, et tournant chacun autour d'un pôle d'électro-aimant en forme d'U. Un second électro-aimant, placé entre les cylindres mobiles, est muni de pièces polaires qui se recourbent au-dessus et au-dessous des

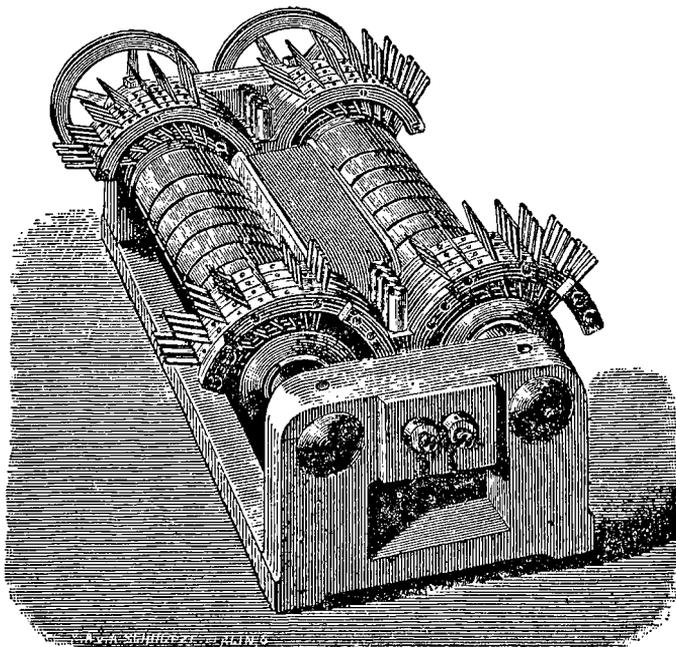


FIG. 141. — Machine Unipolaire Siemens.

cylindres, de manière à les envelopper complètement. Il en résulte que chaque cylindre tourne entre un pôle intérieur et un pôle extérieur, de polarités opposées, et coupe, par conséquent, les lignes de force d'une manière continue en glissant sur le pôle interne. Les courants fournis par cette machine ont une très grande intensité mais une force électromotrice de quelques volts seulement. Pour diminuer la résistance, chacun des cylindres est pressé à ses deux extrémités par un grand nombre de balais collecteurs. Cette machine dynamo a été employée à Oker comme machine électro-chimique.

Machines Delafield, et Ferraris. — D'autres machines unipolaires de forme presque identique ont été imaginées par M. Floyd Delafield et M. Ferraris. On n'en connaît pas les détails de construction.

Machine Voice. — La seule autre dynamo de cette catégorie dont la description ait été publiée, à ma connaissance, est une machine récemment brevetée par M. E.-L. Voice, dans laquelle l'armature, formée d'une bobine roulée sur un anneau de fer, est placée de telle sorte que l'anneau de fer constitue lui-même un pôle d'aimant; une pièce polaire venant de l'autre pôle est disposée à proximité; les bobines fixées sur l'un des pôles glissent ainsi autour de l'autre en coupant les lignes de force qui en émanent. Toute la question est de savoir si cette machine est pratique.

Il est singulier que, malgré toute l'attention donnée dans ces derniers temps aux machines de ce type, personne ne soit encore arrivé à produire une machine unipolaire pratique. Il me paraît y avoir quelque chose d'anormal dans la théorie des machines de cette classe; le fait est que celles qui sont conçues sans précautions contre le développement de courants internes parasites et nuisibles fonctionnent tant bien que mal, tandis que celles où toutes précautions ont été prises à cet égard ne fonctionnent pour ainsi dire pas. — L'auteur lui-même a imaginé une machine de ce genre, dans laquelle deux disques de Faraday couplés à leur périphérie extérieurement à une pièce polaire interne immobile tournent dans un champ magnétique symétriquement uniforme. — M. S.-A. Varley a fait également des recherches dans le même ordre d'idées. — Plus récemment encore M. Willoughby Smith a montré que si l'on emploie un disque de fer au lieu d'un disque de cuivre dans l'appareil de Faraday, on obtient un effet beaucoup plus puissant, et la force électromotrice est plus sensiblement proportionnelle à la vitesse que dans le cas d'un disque de cuivre.

Machines non classées.

Il existe deux ou trois autres types nouveaux qui, jusqu'à présent, ne peuvent être guère regardés que comme des curiosités. — Telle

est, par exemple, l'inconcevable¹ élucubration d'Edison dite « dynamo-pendule » dans laquelle les bobines, au lieu de tourner autour d'un axe, reçoivent un mouvement de va-et-vient à l'extrémité de tiges de près de 3 mètres de long. — Telle est également la machine imaginée par Sir Charles Bright dans laquelle les bobines d'électro-aimants et l'armature restent immobiles, tandis que les noyaux de fer et les balais sont mobiles. — M. le professeur G. Forbes a conçu une autre machine où une partie des électro-aimants est mobile. — M. C. Lever en a fait une basée sur des principes assez analogues à ceux de la précédente. — J'ai moi-même essayé une machine à courants alternatifs dans laquelle l'armature aussi bien que les électro-aimants sont immobiles, le mouvement n'étant donné qu'à des pièces polaires en lames. — J'ai aussi entendu parler d'une machine américaine n'ayant pas d'électro-aimants, mais seulement deux armatures mobiles².

1. Le texte anglais porte « *absurd* ». (N. du T.)

2. Sans être ennemi du progrès et sans vouloir prétendre que l'électro-dynamique ait dit son dernier mot, nous comprenons peu, nous devons l'avouer, le mobile auquel obéissent tous ceux qui s'occupent d'électricité en cherchant de nouvelles machines plus ou moins imitées de celles qui existent aujourd'hui. Quand on a deux ou trois types aussi variés dans leur puissance et aussi parfaits dans leur rendement, puisqu'ils arrivent à convertir en énergie électrique 89 à 99 pour 100 de l'énergie mécanique qui leur est fournie, on se demande quel avantage on peut espérer recueillir de ces incessantes et encombrantes créations. Un rendement de quelques centièmes ou fractions de centième en plus vaut-il réellement tant de temps et de travail dépensés? (N. du T.)

CHAPITRE X

THÉORIE ALGÈBRIQUE DE LA MACHINE DYNAMO

Bases élémentaires des calculs.

Les chapitres qui suivent sont consacrés à la recherche d'expressions algébriques de la force électromotrice, de l'intensité du courant et du coefficient économique des principaux types de machines dynamos. Comme introduction, nous donnerons d'abord une expression de la force électromotrice induite dans une simple spire tournant dans un champ magnétique uniforme. Nous serons ainsi tout naturellement conduits à la considération des machines magnéto-dynamos dans lesquelles le champ magnétique est dû à des aimants permanents en acier. Nous passerons aisément de là aux machines dynamos dont les électro-aimants sont excités séparément par des courants issus d'une source indépendante. Puis viendra la dynamo ordinaire ou montée en série et ensuite celle montée en dérivation. Enfin nous terminerons par les différents genres de machines *compound* (compensées) destinées à fournir, soit une différence de potentiel constante, soit une intensité de courant constante.

Pour permettre au lecteur de suivre plus facilement le développement des expressions formulées dans ce chapitre et dans les suivants, nous croyons utile de donner tout d'abord une liste générale des symboles employés et de leur signification :

- A coefficient d'armature, exprimé en *centimètres carrés* (voir pp. 194 et 196).
- β largeur angulaire d'une section ou bobine élémentaire d'armature ou d'un segment de collecteur.

- c nombre de segments d'un collecteur ou commutateur.
- E force électromotrice totale engendrée dans une armature,
- ε différence de potentiel de balai à balai,
- e différence de potentiel de borne à borne,
- \mathcal{E} force électromotrice sous laquelle est fourni un courant électrique extérieur, } exprimées en volts.
- η coefficient économique (voir p. 216).
- F force (traction ou poussée) exprimée en *dynes*, *poundals*¹, *grammes* (poids), ou *livres* (poids).
- G coefficient géométrique, propre aux électro-aimants, et dépendant uniquement de leurs dimensions et de leur forme, ou des dimensions et de la forme de leurs bobines et pièces polaires (voir la note, p. 235).
- H intensité de champ magnétique, exprimée en *gauss* (voir la note 3, p. 194).
- i courant² dans un circuit extérieur,
- i_a courant dans une armature,
- i_d courant dans une bobine en dérivation,
- i_m courant dans une bobine en série d'électro-aimant, } exprimés en ampères.
- μ coefficient de perméabilité magnétique du fer (voir la note p. 236).
- λ longueur moyenne d'un tour de fil ou spire dans une bobine.
- N nombre de lignes de force magnétiques.
- n nombre de tours ou révolutions par seconde.
- ν nombre de tours de fil ou de spires dans une bobine élémentaire ou section.
- ω vitesse angulaire (exprimée en *radians* par seconde).
- R résistance d'un circuit extérieur,
- r_a résistance des bobines d'armature,
- r_d résistance de bobines en dérivation } d'électro-aimants, } exprimées en ohms.
- r_m résistance de bobines en série
- r résistance intérieure d'une dynamo; égale à $r_a + r_m$ ou à $r_a + r_d$, suivant les cas,
- ρ résistance par unité de longueur,
- σ coefficient de saturation du fer (voir la note p. 233).
- T** ou t temps (exprimé en *secondes*).
- T** également employé dans la section relative aux machines à courants alternatifs comme symbole du temps périodique d'un courant alternatif (exprimé en *secondes*).
- \mathcal{T} *torque*, moment de torsion, force angulaire, couple, effort statique ou moment statique (exprimé en *dynes-centimètres*, *grammes-centimètres*, *kilogrammètres*, ou *pound-feet*, suivant les cas).

1. Ancienne unité anglaise de force : c'est la force qui, agissant sur la masse d'une livre anglaise pendant une seconde, lui imprime une vitesse d'un pied par seconde. — 1 *poundal* = 13825 dynes. (*N. du T.*)

2. Il nous arrivera souvent, dans le cours de cette traduction, d'employer, suivant l'habitude anglaise, le mot *courant* seul au lieu d'*intensité de courant*. Cette expression plus simple enlève parfois de la lourdeur au style; elle nous paraît d'ailleurs satisfaisante pleinement à l'exactitude scientifique, aussi bien quand il s'agit d'électricité que lorsqu'il est question d'un cours d'eau, etc. (*N. du T.*)

U coefficient de self-induction.

$\left. \begin{matrix} W \\ w \end{matrix} \right\}$ activité ou travail par seconde (exprimés en *watts* ou en *chevaux-vapeur*).

Y nombre de tours de fil ou de spires dans une bobine d'électro-aimant en série sur une armature.

Z nombre de tours de fil ou de spires dans une bobine d'électro-aimant en dérivation.

Dynamo élémentaire idéale.

Considérons une simple boucle de fil, courbée soit en cercle, soit en forme de rectangle, et tournant dans un champ magnétique uniforme autour d'un axe situé dans son propre plan. La figure 142 donne une idée de la réalisation de cette machine théorique.

La *force électromotrice moyenne* se calcule de la manière sui-

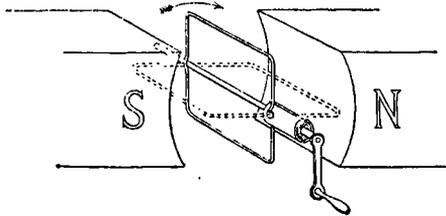


FIG. 142. — Dynamo élémentaire idéale.

vante : — On sait que si une bobine coupe, dans son mouvement de rotation, les lignes de force de manière à ajouter un certain nombre de ces lignes à celles qui traversent déjà le circuit, la force électromotrice ainsi induite est numériquement égale au nombre de lignes interceptées divisé par le temps mis à les intercepter. Pour plus de simplicité, nous appellerons la proportion dans laquelle ces lignes de force additionnelles sont ainsi interceptées, le taux d'« interception » des lignes. Si nous représentons le nombre de lignes de force additionnelles ainsi interceptées par le symbole N , et par T le temps (exprimé en secondes) occupé par cette action, nous pouvons écrire :

$$\text{Taux moyen d'interception} = \frac{N}{T}.$$

Ou bien, si nous nous rappelons que ce taux moyen d'interception n'est autre que la force électromotrice moyenne ainsi induite, nous pouvons écrire, en désignant par E la force électromotrice :

$$E(\text{moyenne}) = \frac{N}{T}.$$

Maintenant, dans le cas idéal que nous nous sommes donné, comment devons-nous calculer le nombre N ? Supposons au circuit mobile en boucle une surface exprimée en centimètres carrés que nous désignerons par la lettre A . Supposons également que l'intensité du champ magnétique soit représentée par le symbole H , ce qui veut dire qu'il y a H lignes de force par centimètre carré de section transversale du champ magnétique. Il en résulte évidemment que le plus grand nombre de lignes de force qui puisse réellement passer à un instant quelconque à travers la boucle, d'un côté à l'autre, est HA . Si la boucle occupe la position verticale indiquée sur la figure 142, elle embrassera HA lignes de force. Dans toute autre position, elle en embrassera moins. Quand elle sera parallèle aux lignes de force, comme dans la position indiquée par les lignes ponctuées, elle n'interceptera aucune ligne de force. Partant de cette position, si on la fait tourner de 90 degrés pour la faire arriver à la position verticale, le nombre de lignes de force intercepté ira en croissant depuis 0 jusqu'à HA . Dans les 90 degrés suivants de sa rotation, toutes les lignes de force sortiront successivement de la boucle. Dans le troisième quadrant du mouvement, toutes ces lignes seront de nouveau successivement interceptées et traverseront la boucle dans le sens négatif; enfin dans le quatrième quadrant, ces lignes négatives de force disparaîtront encore une fois de la boucle. Dans chacun des quatre quadrants le nombre de lignes de force intercepté, soit positivement, soit négativement, est par conséquent HA ; et, en munissant la boucle d'un simple commutateur formé d'un tube fendu en connexion avec une paire de ressorts métalliques ou de balais, on pourra obtenir, des forces électromotrices développées pendant chacun des quatre quadrants du mouvement, l'émission de courants de même sens à travers le circuit extérieur. Si l'on dési-

gne par T la durée d'une révolution complète, on aura par suite :

$$E \text{ (moyenne)} = \frac{4 \Pi A}{T}.$$

Si la vitesse est grande, T sera une petite fraction de seconde. Désignons-la par $\frac{1}{n}$ de seconde; en d'autres termes soit n le nombre de révolutions par seconde. Nous pouvons dès lors remplacer par n la fraction $\frac{1}{T}$, et notre formule devient :

$$E \text{ (moyenne)} = 4n \Pi A. \quad [I.]$$

Mais dans bien des cas, il est plus commode d'exprimer cette valeur en fonction de la vitesse angulaire. Représentons par le symbole ω la vitesse angulaire.

On a

$$\omega = 2\pi n,$$

car pour chaque révolution l'angle décrit est 2π radians ou 360° .

Par suite $n = \frac{\omega}{2\pi}$; ce qui, en substituant, ramène notre formule à

$$E \text{ (moyenne)} = \frac{4 \Pi A \omega}{2\pi},$$

d'où finalement en réduisant,

$$E \text{ (moyenne)} = \frac{2}{\pi} \omega \Pi A. \quad [I\alpha.]$$

Note (1). — On remarquera que cette force électromotrice n'est pas autre chose qu'une moyenne, et qu'en réalité, la force électromotrice oscille entre zéro et un maximum. Si nous appelons 0 degré le point le plus bas de la boucle mobile dans sa position verticale, le point à gauche de la ligne ponctuée sera 90° degrés, les angles de rotation étant comptés dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre. Le point supérieur sera 180° degrés et le point à l'extrême droite 270° degrés. Dès lors la force électromotrice sera

maxima pour les positions 0 degré et 180 degrés occupées par la boucle, et nulle pour les positions 90 degrés et 270 degrés, car le *taux* d'interception est *maximum* quand le *nombre réel* de lignes intercepté est *minimum*, et *vice versa* (voir p. 56).

Note (2). — Pour tout angle intermédiaire quelconque, le nombre réel de lignes de force intercepté est proportionnel au cosinus de l'angle parcouru par la boucle depuis sa position zéro, et la force électromotrice est proportionnelle au sinus de cet angle. Strictement parlant, nous devrions prendre le sinus en valeur *négative* pour représenter la force électromotrice, parce que la force électromotrice induite, telle qu'on la définit ordinairement, est proportionnelle au taux de la *diminution* du nombre de lignes de force intercepté. Nous n'avons pas cependant à nous préoccuper des signes, attendu que, si le commutateur est convenablement monté, il détermine l'action de toutes les forces électromotrices induites dans le même sens à travers le circuit extérieur. — La force électromotrice réelle dans la boucle au moment où elle a tourné d'un angle θ *pourrait* en conséquence parfaitement s'écrire :

$$E = \omega H A \sin \theta, \quad [\text{II.}]$$

et cette expression prendrait des valeurs oscillant entre 0 et $\omega H A$ suivant les variations de θ du commencement à la fin d'un quadrant de la rotation. Mais la valeur moyenne de $\sin \theta$, entre les limites $\theta = 0$ et $\theta = 90$ degrés étant $= \frac{2}{\pi}$, la force électromotrice *moyenne* peut s'obtenir par la substitution de cette valeur à $\sin \theta$, ce qui donne comme précédemment :

$$E (\text{moyenne}) = \frac{2}{\pi} \omega H A.$$

Note (3). — Si A est exprimé en centimètres carrés et qu'on désire avoir E en volts, H ne doit plus être exprimé en unités usuelles d'intensité de champ magnétique du système centimètre-gramme-seconde; car dans ce système, l'unité de force électromotrice n'est que la cent-millionième partie de 1 volt. Le volt étant

10^8 unités C. G. S. de force électromotrice, l'unité correspondante d'intensité de champ magnétique serait 10^8 unités C. G. S. Cette unité d'intensité de champ magnétique pourrait s'appeler « un *gauss* ». — Si \mathbb{H} est exprimé en *gauss* et A en centimètres carrés, alors $4 n \mathbb{H} A$ sera la force électromotrice moyenne en *volts*,

**Armature élémentaire formée d'un grand nombre
de tours de fil (sans fer).**

Nous avons jusqu'ici considéré une armature formée d'un seul tour de fil. Supposons, cependant, l'armature constituée par une bobine de ν tours, tous de même surface, et tous ces tours de fil enroulés l'un à côté de l'autre sur une âme en bois ou en toute autre substance non magnétique, les extrémités de la bobine étant reliées comme précédemment à un commutateur simple formé d'un tube fendu en 2 parties (fig. 17, p. 22, et fig. 145, p. 200). La force électromotrice induite sera évidemment ν fois aussi grande que s'il n'y avait qu'une seule spire. Grâce à ce que la résistance est aussi plus grande, il est clair que le courant engendré dans le circuit total ne serait pas ν fois aussi grand que s'il n'y avait qu'un seul tour de fil; mais nous ne nous occupons pas ici du courant : nous considérons uniquement la force électromotrice. D'ailleurs, dans la pratique, si le fil était enroulé en plusieurs couches sur l'âme, la surface offerte par chaque tour ne serait pas identique, les spires extérieures de la bobine embrassant une surface plus grande. Si néanmoins nous pouvions calculer la surface moyenne embrassée, en l'appelant α , l'effet total de la bobine de ν tours ayant chacun la surface moyenne α serait ν fois égal à celui de la spire de surface α ; il serait, en d'autres termes, égal à l'effet que pourrait produire une seule grande spire de surface $= \nu \times \alpha$. Nous pourrions donc écrire l'action produite sous la forme :

$$E \text{ (moyenne)} = 4 n \mathbb{H} \alpha \nu.$$

Mais nous pouvons aussi bien employer le symbole A pour la

surface équivalente à ν fois a , et dès lors notre formule primitive

$$E \text{ (moyenne)} = 4 n I A$$

subsiste encore, à la condition de ne pas oublier que A représente maintenant la somme de toutes les surfaces des spires individuelles additionnées ensemble. Si la bobine de l'armature est constituée par deux groupes de spires reliés en arc parallèle (comme dans les fig. 23 et 24, p. 24), la force électromotrice due aux deux groupes ne sera pas supérieure à celle produite par un seul groupe; mais d'un autre côté la résistance intérieure sera réduite de moitié. Dans ce cas, A ne sera plus égal qu'à la moitié de $\alpha \nu$, en ce qui concerne du moins la puissance inductrice de force électromotrice de l'armature.

Armature élémentaire à âme de fer.

Supposons maintenant la bobine roulée sur une armature à âme de fer. Quelle différence en résultera-t-il? D'abord, le champ magnétique ne sera plus uniforme, à moins qu'une forme spéciale ne soit donnée à cet effet aux pièces polaires. C'est cependant ce qui a généralement lieu dans la pratique, et, bien que le champ magnétique ne soit pas toujours réellement uniforme, la règle précédente subsiste encore: on obtient la force électromotrice *moyenne* en divisant le nombre total de lignes de force additionnelles intercepté par le temps occupé à les intercepter. Mais la différence essentielle réside dans la perméabilité du fer à l'induction magnétique; cette perméabilité est si considérable comparative-ment à celle du bois ou de l'air, qu'elle détermine l'induction d'un nombre de lignes de force bien supérieur à celui qui serait fourni par le même champ inducteur à travers une âme de matière non magnétique. Une âme de fer concentre en elle plus de lignes de force qu'une âme de substance non magnétique: la bobine à âme de fer agit comme une bobine de surface beaucoup plus grande qu'une autre sans âme de fer. Le coefficient par lequel l'âme de fer multiplie l'effet produit peut être symbolisé par la lettre α ; et nous

pouvons dire dès lors que l'action d'une bobine de ν tours de surface moyenne a , avec âme de fer, est égale à z fois celle d'une bobine de ν tours de surface moyenne a , sans fer. Le nombre symbolisé par z peut atteindre une valeur élevée, telle que vingt, trente ou même cinquante, si le fer est pur et très doux. Pour de la fonte, z peut ne pas dépasser les nombres deux ou trois. Sa valeur dépend de la qualité, du grain et de la forme de l'âme, ainsi que de sa section transversale; elle dépend également de l'intensité magnétique du champ, c'est-à-dire de sa capacité au point de vue de la saturation ou de la non-saturation du fer. Nous pouvons, en conséquence, écrire notre formule :

$$E (\text{moyenne}) = 4 n \Pi z a \nu;$$

mais rien ne nous empêche d'étendre la signification de notre premier symbole A et de dire qu'il équivaut à une surface égale à z fois une surface ν fois aussi grande que la surface moyenne a d'un seul tour. Nous pouvons appeler A la « surface équivalente » de la bobine avec ses tours multiples et son âme de fer multiplicatrice, de sorte que, avec cette nouvelle signification, notre première formule subsiste encore sous sa forme

$$E (\text{moyenne}) = 4 n H A.$$

Cette formule est celle qui s'applique à l'ancienne armature Siemens, en double T ou navette, de 1855.

Armature quelconque.

On peut déterminer expérimentalement, de la manière suivante, la valeur de la « surface équivalente » A . — Placez l'armature horizontalement, son axe dans le méridien magnétique et ses spires horizontales, de telle sorte que les lignes de force magnétique terrestres traversent verticalement l'âme de fer. Reliez par des fils les extrémités de la bobine à un circuit comprenant un galvanomètre réflecteur à oscillations lentes et une bobine « étalon » spéciale : cette bobine étalon à laquelle l'armature doit être comparée sera constituée par une bobine de fil bien isolé, enroulé sur une carcasse cylindrique de manière à avoir une forme annulaire d'un grand nombre de tours. Mesurez la surface a' (en centimètres carrés) de l'anneau (ou la surface moyenne de ses spires), et comptez le nombre de tours ν' . S'il y a ν' tours, chacun de surface a' , nous

savons que la surface équivalente de cette bobine est exactement $\alpha'v'$, et nous pouvons par suite l'employer comme étalon. L'armature et la bobine étalon étant reliées en circuit avec le galvanomètre, laissez la bobine étalon à plat sur la table. Retournez-la alors brusquement sur son autre face (il vaut mieux la retourner dans la direction Est-Ouest que dans la direction Nord-Sud) et observez la déviation produite au galvanomètre. Puis, laissant la bobine étalon immobile, tournez de même l'armature d'un demi-tour par un seul mouvement rapide, en notant de nouveau la déviation de l'aiguille du galvanomètre. La surface équivalente A de l'armature se calculera dès lors par une simple règle de trois. En appelant δ_1 la déviation produite avec la bobine étalon, et δ_2 celle produite avec l'armature, on obtient

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{\alpha'v'}{A}.$$

Pour avoir une mesure très exacte, on doit prendre le sinus de la moitié de l'angle de la première oscillation du galvanomètre, au lieu de la simple oscillation.

Ce mode d'opérer pour trouver la « surface équivalente » est applicable aux armatures de tous genres; il y a toutefois une précaution à prendre. Si l'on a affaire à une armature dont les spires de fil ne sont pas toutes réunies en un seul groupe comme dans l'ancienne armature simple en navette de Siemens, mais symétriquement disposées en sections, comme dans les armatures annulaires de Gramme ou de Pacinotti, ou bien encore dans les armatures cylindriques de Siemens (Altneck) et d'Edison, et si les connexions avec le circuit sont établies en deux points opposés du système entier des bobines élémentaires (comme par soudure des fils à deux lames opposées du collecteur), la déviation au galvanomètre *ne sera pas* proportionnelle à A, parce que, dans ce cas, les bobines élémentaires ne sont pas toutes horizontales avant et après le demi-tour de l'armature sur elle-même. Les bobines élémentaires engendrent, en réalité, des courants proportionnels au sinus de l'angle dont elles ont tourné. Et comme elles tournent toutes de 180 degrés, l'action sera proportionnelle à la valeur moyenne du sinus entre 0 et 180 degrés, c'est-à-dire à $\frac{2}{\pi}$; de plus, comme il existe deux voies offertes au courant à travers les deux moitiés de l'enroulement de balai à balai, la force électromotrice induite ne sera que la moitié de ce qu'elle serait s'il n'y avait qu'un seul passage pour le courant; en d'autres termes, A aura, en réalité, une valeur double de celle obtenue avec la force électromotrice due aux deux groupes de bobines réunis en arc parallèle comme ils le sont dans ces armatures. La déviation sera, en fait, proportionnelle à $\frac{2}{\pi} A$ et non pas à A; et la valeur déduite par application de la règle de trois devra par suite être multipliée par $\frac{\pi}{2}$ pour donner la véritable valeur de A.

Note. — Quand une dynamo travaille à pleine charge et qu'un courant parcourt les bobines élémentaires de son armature, la « surface équivalente » n'a plus exactement la même valeur que quand l'armature reste immobile; en effet, ainsi que nous l'avons vu, le symbole A comprend un facteur α , représentant

l'effet multiplicateur de l'âme de fer. Mais les âmes de fer, lorsque le courant magnétisant qui les enveloppe est intense, tendent à se saturer, et par suite leur effet multiplicateur diminue. Pour la machine en plein travail, la surface équivalente A' est plus approximativement représentée par $A' = \frac{A}{1 + \sigma i}$, i étant l'intensité du courant qui parcourt les bobines de l'armature, et σ une petite constante (fractionnaire) dépendant de la saturation du fer de l'âme. Une âme dont la température est élevée possède une perméabilité magnétique inférieure à celle qu'elle possède à froid. Les armatures, quand elles sont échauffées, agissent comme si elles avaient des dimensions moindres : leur « surface équivalente » est plus petite qu'à froid.

Nous pourrions maintenant poursuivre notre étude par l'examen des formes plus compliquées d'armatures. Celles du type « annulaire » sont, en général, d'une construction plus facile que celles du type « cylindrique » ; mais les calculs sont plus simples pour ces dernières. Nous commencerons, en conséquence, par elles.

Toutefois pour bien comprendre l'avantage réel des formes plus compliquées, il est bon de se rendre préalablement un compte exact de la nature des ondulations de la force électromotrice dont nous avons seulement trouvé la valeur moyenne.

Ondulations de la Force électromotrice dans une armature à bobine unique.

Ainsi que nous l'avons précédemment exposé, la force électromotrice réelle induite est proportionnelle au sinus de l'angle dont la bobine a tourné, ou

$$E = \omega HA \sin \theta.$$

Quand θ augmente de 0 à 360 degrés, la valeur du sinus passe de 0 à 1, puis de 1 à 0, ensuite de 0 à -1 et finalement de -1 à 0. Les valeurs du sinus sont représentées dans la figure 143. La même courbe peut donc servir à montrer comment oscillerait la force électromotrice s'il n'y avait pas de commutateur. Mais le commutateur a pour effet de transformer les inductions négatives en inductions positives, les balais étant disposés de manière à passer d'une lame du commutateur à l'autre au moment où commence l'induction inverse. Il en résulte pour la courbe la forme

indiquée par la figure 144, qui, par suite, représente les impulsions du courant dans le circuit d'une armature élémentaire de l'ancien type Siemens en navette. Mais si nous pouvions niveler ces sinuosités et transformer notre induction ondulatoire en une induction

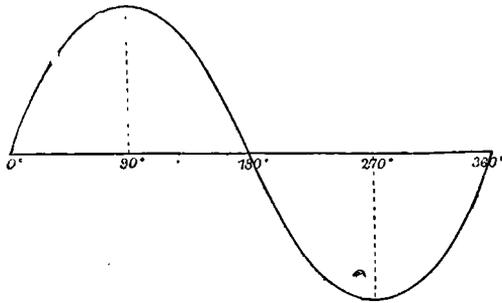


FIG. 143.

régulière, nous obtiendrions une seule ligne droite, indiquée en pointillé dans la figure 144, qui comprendrait, au-dessous d'elle, une surface rectangulaire égale à la somme des surfaces enveloppées par les lignes courbes et se trouverait, par suite, à une hauteur

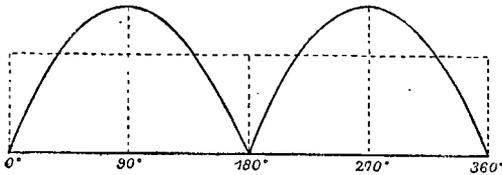


FIG. 144.

qui serait la moyenne des hauteurs des différents points de ces courbes : par le fait, chacune de ces lignes faisant partie d'une courbe de sinus, la hauteur *moyenne* serait $\frac{2}{\pi}$ ou environ $\frac{7}{11}$ de leur hauteur maxima.

Ondulations dans une bobine d'armature divisée en sections.

Comme nous l'avons vu dans la description donnée pages 23 et 24, ce sont des raisons de construction qui font rouler les

bobines d'armature en deux groupes reliés en arc parallèle. Les deux moitiés de l'anneau Pacinotti, les deux moitiés de la bobine cylindrique de Siemens, se réunissent aux balais en arc parallèle. Si chacune d'elles est formée de 100 tours de fil, leur effet conjugué d'induction de force électromotrice n'est pas plus grand que celui de l'une d'entre elles agissant séparément, mais la résistance intérieure de l'armature est moitié moindre. Partant de là, nous admettons, dans les développements qui suivent, que les enroulements d'armatures sont formés de *paires* de bobines. Ainsi, au lieu d'une bobine de 200 tours de-fil comme l'indique la figure 145, nous admettons qu'il y a une paire de bobines de 100 tours chacune comme dans la figure 146.

Supposons maintenant que, pour obtenir une ondulation

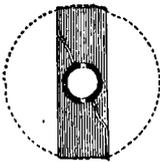


FIG. 145.

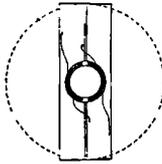


FIG. 146.

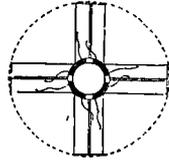


FIG. 147.

moindre, nous divisons chacune de nos paires primitives de bobines en deux parties, et que nous les disposons à angles droits l'une par rapport à l'autre. Pour prendre un exemple numérique, supposons qu'il y eût primitivement 100 tours de fil sur chaque bobine, et que nous les partagions chacune en deux bobines de 50 tours, mais que nous les montions en croix l'une par rapport à l'autre, de telle sorte que l'une arrive à la position d'action maxima dans le champ au moment où l'autre la quitte. (Cette disposition est indiquée dans la figure 147 que l'on peut comparer avec la figure 146 représentant la bobine non divisée.) Dans ce cas, nous aurons deux systèmes de courbes en chevauchement et chacune de ces courbes n'aura plus que la moitié de la hauteur précédente en raison de ce que la surface équivalente de chaque bobine ne sera plus que la moitié de ce qu'elle était pour la bobine entière. Dès lors, s'il n'y avait pas de commutateur, la force électromotrice induite dans les deux groupes de bobines présenterait les ondula-

tions indiquées par les deux courbes de la figure 148. Mais si les extrémités des deux « sections » de la bobine sont reliées à un commutateur ou à un collecteur spécial, toutes les inductions « inverses » seront changées en inductions « directes » par le pas-

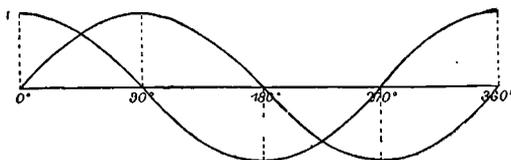


FIG. 148.

sage des balais au moment voulu, et les deux courbes deviendront alors telles qu'elles sont indiquées dans la figure 149. Il s'agit dès lors de voir quel sera le résultat conjugué de cette superposition

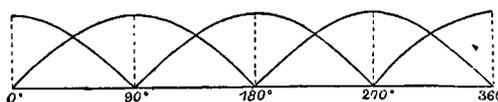


FIG. 149.

de forces électromotrices : il est évident que de 0 degré à 90 degrés les deux actions inductrices viennent s'ajouter et qu'à 45 degrés elles sont égales. Le résultat net est, par suite, ici double de l'effet

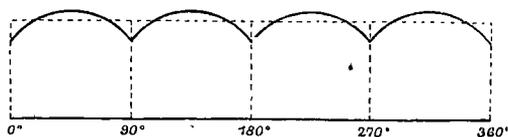


FIG. 150.

qu'elles produiraient individuellement; et, par le fait, la courbe représentant la *somme* des deux courbes est celle donnée par la figure 150. On voit de suite que cette courbe est un pas en avant vers la *continuité*; ses ondulations sont bien moindres que celles fournies par une bobine unique (fig. 144). Si, comme tout à l'heure, nous nivelons les sommets ondulatoires par une ligne ponctuée, nous obtenons exactement la même hauteur que précé-

demment. L'induction *totale* produite (le nombre total de lignes de force coupé) est la même, et la force électromotrice *moyenne* est aussi la même. Il n'y a, par conséquent, aucun gain dans le travail électrique total résultant du nouveau montage des bobines de l'armature en deux groupes perpendiculaires entre eux : mais il y a, en réalité, un gain dans le fait de la continuité et de la régularité supérieures du courant.

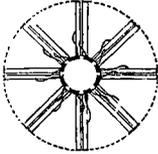


FIG. 151.

Si nous divisons encore nos bobines et que nous les montions à 45 degrés l'une de l'autre, comme l'indique la figure 151, en quatre groupes de paires de bobines de vingt-cinq tours chacune, reliés ensuite à un commutateur convenablement

disposé, nous obtiendrons un effet qu'on peut très facilement représenter à l'aide de deux courbes semblables chacune à la précédente, mais de hauteur moitié moindre, et se compensant comme

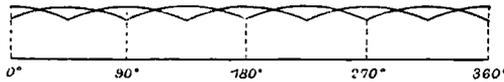


FIG. 152.

l'indique la figure 152. L'une d'elles présentera naturellement ses sommets 45 degrés en avance sur ceux de l'autre; et leur sommation fournira une courbe résultante telle que celle de la figure 153

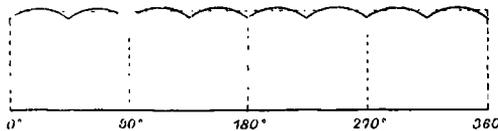


FIG. 153.

qui présente exactement la même hauteur *moyenne* que précédemment, mais avec encore moins d'ondulation. On conçoit aisément que ce mode de procéder consistant à diviser la bobine d'armature en sections et à disposer symétriquement ces sections à distances angulaires égales nous conduise à un résultat aussi approché que nous voudrions de la continuité absolue. Si notre paire primitive de bobines de 100 tours de fil chacune était divisée en vingt groupes de paires de cinq tours chacune, ou même en dix groupes de paires

de dix tours chacune, nous arriverions aussi près que possible de la continuité absolue. Il ne reste plus qu'à calculer algébriquement cette continuité, opération sinon difficile, du moins assez fastidieuse.

Calcul des Ondulations de la Force électromotrice dans les bobines d'armature.

Nous avons vu au Chapitre III que, dans toute armature, une section de la bobine reliée à deux lames quelconques de commutateur subit, à chaque instant, un effet d'induction exactement semblable, mais de signe contraire, à celui produit dans la section reliée aux deux lames diamétralement opposées du commutateur. Nous avons assimilé les deux groupes de bobines, dans les deux moitiés de l'armature, à deux groupes d'éléments galvaniques montés parallèlement. Supposons que l'armature ait en tout trente-six sections, il y en a, en réalité, deux groupes de dix-huit, et la force électromotrice induite dans chaque groupe est identique. Représentons par le symbole c le nombre total de sections de bobines dans l'armature.

Il y aura, par suite, $\frac{c}{2}$ sections dans chaque moitié de l'armature de balai à balai. Supposons que chaque section comporte v tours de fil. L'armature totale contiendra vc tours. Si ces c sections sont disposées symétriquement autour de la bobine, l'angle compris entre le plan de chaque section et celui de la suivante sera de $\frac{360}{c}$ degrés ou $\frac{2\pi}{c}$ radians. Cette expression peut s'écrire $\frac{\omega}{\frac{1}{2}c}$; et, pour abrégé, nous appellerons cet angle β . Nous calculerons dès lors la force électromotrice totale induite dans un des groupes de sections, c'est-à-dire dans l'une des séries de $\frac{1}{2}c$ sections de bobines, en parcourant la moitié de l'armature et du commutateur de l'un des balais à l'autre. En nous reportant à l'équation [I.] nous voyons que dans la première section, lorsqu'elle a tourné d'un angle θ , la force électromotrice induite e_1 est

$$e_1 = \omega H A_1 v \sin \theta,$$

ω représentant la vitesse angulaire, Π l'intensité du champ magnétique, et A_1 la surface équivalente d'une spire de la bobine. Dans la seconde section, la force électromotrice sera

$$e_2 = \omega H A_1 v \sin (\theta + \beta),$$

puisque cette section occupe une position différant d'un angle β de celle de la première section. Dans la troisième section, nous aurons de même

$$e_3 = \omega H A_1 v \sin (\theta + 2 \beta);$$

et ainsi de suite, jusqu'à ce que nous arrivions à la dernière section du groupe, pour laquelle la force électromotrice sera

$$e_{\frac{1}{2}c} = \omega H A_1 v \sin \left[\theta + \left(\frac{1}{2} c - 1 \right) \beta \right].$$

Mais la force électromotrice totale du groupe est la somme de toutes ces forces électromotrices individuelles, ce qui nous donne :

$$E = \omega H A_1 v \times \left\{ \sin \theta + \sin (\theta + \beta) + \sin (\theta + 2 \beta) + \dots + \sin \left[\theta + \left(\frac{1}{2} c - 1 \right) \beta \right] \right\}.$$

Nous ne pouvons néanmoins avoir aucune indication relative aux valeurs maxima et minima de cette force électromotrice ondulatoire tant que l'expression de E conserve la forme d'une longue série de valeurs. Il faut arriver à sommer cette série entre accolades. Désignons cette somme par X .

Puis, pour pouvoir additionner ses différents termes, multiplions chacun d'eux par $2 \sin \frac{\beta}{2}$; nous aurons

$$\begin{array}{ll} \sin \theta & \times 2 \sin \frac{\beta}{2} = \cos \left(\theta - \frac{\beta}{2} \right) - \cos \left(\theta + \frac{\beta}{2} \right), \\ \sin (\theta + \beta) & \times 2 \sin \frac{\beta}{2} = \cos \left(\theta + \frac{\beta}{2} \right) - \cos \left(\theta + 3 \frac{\beta}{2} \right), \\ \sin (\theta + 2 \beta) & \times 2 \sin \frac{\beta}{2} = \cos \left(\theta + 3 \frac{\beta}{2} \right) - \cos \left(\theta + 5 \frac{\beta}{2} \right), \\ \text{etc.} & \text{etc.} \quad \text{etc.} \\ \sin \left[\theta + \left(\frac{1}{2} c - 1 \right) \beta \right] & \times 2 \sin \frac{\beta}{2} = \dots - \cos \left[\theta + \left(\frac{1}{2} c - 1 \right) \beta + 1 \frac{\beta}{2} \right]. \end{array}$$

On remarquera que si l'on additionne tous le termes des seconds membres des équations ci-dessus, ces termes s'annulent deux à deux en laissant subsister uniquement le premier et le dernier, ce qui donne :

$$X \times 2 \sin \frac{\beta}{2} = \cos \left(\theta - \frac{\beta}{2} \right) - \cos \left[0 + \left(\frac{1}{2}c - 1 \right) \beta + \frac{\beta}{2} \right].$$

Mais $\frac{1}{2}c\beta = \varpi$, et $\left(\frac{1}{2}c - 1 \right) \beta = \varpi - \beta$; par suite le dernier terme peut s'écrire $-\cos \left(\theta + \varpi - \frac{\beta}{2} \right)$, ce qui est la même chose que $+\cos \left(\theta - \frac{\beta}{2} \right)$.

Dès lors, l'expression devient

$$X \times 2 \sin \frac{\beta}{2} = 2 \cos \left(\theta - \frac{\beta}{2} \right)$$

d'où

$$X = \frac{\cos \left(\theta - \frac{\beta}{2} \right)}{\sin \frac{\beta}{2}}.$$

En insérant cette valeur dans l'expression de E , on a immédiatement

$$E = \omega \Pi A_1 v \frac{\cos \left(\frac{\beta}{2} - \theta \right)}{\sin \frac{\beta}{2}}.$$

Le degré d'ondulation impliqué par cette formule dépend de la position occupée par les balais. Ils passent, naturellement, d'une lame du commutateur à l'autre quand le commutateur tourne de l'angle β . Ainsi, si $\theta = 0$ au début, quand la lame du commutateur commence juste à toucher le balai, alors $\theta = \beta$ au moment précis où la lame cesse d'être en contact avec le balai. Et quand le balai touche le milieu de la lame, $\theta = \frac{\beta}{2}$. Mais le cosinus est maximum

quand l'angle est minimum. Par suite E sera maximum pour $\frac{\beta}{2} = \theta$, c'est-à-dire pour $\frac{\beta}{2} - \theta = 0$; et E sera minimum soit pour $\theta = 0$, soit pour $\theta = \beta$. Nous avons, par conséquent, les résultats suivants pour le passage de la lame du commutateur sous le balai : —

(1.) Au début ($\theta = 0$),

$$\begin{aligned} E \text{ (minimum)} \dots &= \omega H A_1 \nu \frac{\cos \frac{\beta}{2}}{\sin \frac{\beta}{2}} \\ &= \omega H A_1 \nu \cotang \frac{90^\circ}{\frac{1}{2}c} \end{aligned}$$

(2.) Au milieu de la lame ($\theta = \frac{\beta}{2}$),

$$\begin{aligned} E \text{ (maximum)} \dots &= \omega H A_1 \nu \frac{1}{\sin \frac{\beta}{2}} \\ &= \omega H A_1 \nu \operatorname{cosec} \frac{90^\circ}{\frac{1}{2}c} \end{aligned}$$

(3.) A la fin ($\theta = \beta$),

$$\begin{aligned} E \text{ (de nouveau minimum)} &= \omega H A_1 \nu \frac{\cos \frac{\beta}{2}}{\sin \frac{\beta}{2}} \\ &= \omega H A_1 \nu \cotang \frac{90^\circ}{\frac{1}{2}c} \end{aligned}$$

La plus grande ondulation qui puisse se présenter correspondra donc à la différence entre $\operatorname{cosec} \frac{90^\circ}{\frac{1}{2}c}$ et $\cotang \frac{90^\circ}{\frac{1}{2}c}$; et, comme chaque lame en passant sous les balais arrive juste à la position occupée par la lame qui la précède, il y aura autant d'ondulations par tour qu'il y a de lames au commutateur ou de sections dans l'armature,

c'est-à-dire c . De plus, si nous pouvons augmenter indéfiniment le nombre des sections, de telle sorte que $\frac{90^\circ}{\frac{1}{2}c}$ ou $\frac{\beta}{2}$ soit pratiquement $= 0^\circ$, alors $\text{coséc} \frac{90^\circ}{\frac{1}{2}c}$ et $\text{cotang} \frac{90^\circ}{\frac{1}{2}c}$ seront toutes deux égales à $\frac{c}{\omega}$; car $\frac{90^\circ}{\frac{1}{2}c} = \frac{\omega}{c}$, et pour de faibles angles l'arc est sensiblement égal soit au sinus, soit à la tangente. Nous calculerons cependant le véritable degré d'ondulation pour certains cas.

Un assez grand nombre de dynamos comportent des armatures ayant un commutateur en 36 parties et 36 sections dans la bobine d'armature. Nous désirons connaître les ondulations dans ce cas et dans d'autres, avec plus ou moins de segments. Le tableau suivant fournit les résultats des calculs; le nombre des sections de l'armature et du commutateur étant donné dans la première colonne, et leur largeur angulaire dans la seconde, l'ondulation est la différence entre les colonnes 3 et 4 :

c	β	$\frac{\text{coséc} \frac{\beta}{2}}{c}$	$\frac{\text{COTANG} \frac{\beta}{2}}{c}$	ONDULATION.	ONDULATION p. 100.
1.	2.	3.	4.	5.	6.
2	180°	0,5	0,0000	0,5	$\pm 50,00$
4	90	0,3479	0,2500	0,0979	14,04
10	36	0,3236	0,3077	0,0159	2,38
12	30	0,3220	0,3110	0,0110	1,70
15	24	0,3206	0,3136	0,0070	1,10
20	18	0,3196	0,3157	0,0039	0,61
24	15	0,3192	0,3165	0,0027	0,42
30	12	0,3189	0,3171	0,0018	0,28
36	10	0,3187	0,3175	0,0012	0,19
40	9	0,3186	0,3177	0,0009	0,14
45	8	0,31857	0,31780	0,00077	0,12
60	6	0,31846	0,31802	0,00044	0,07
90	4	0,31838	0,31819	0,00019	0,03
360	1	0,31832	0,31830	0,00002	0,003
5400	0°4'	0,3183099	0,3183098	0,0000001	0,00001

Ces chiffres montrent clairement que les ondulations deviennent pratiquement insignifiantes quand on augmente le nombre des sections; c'est ce qu'indiquaient d'ailleurs les courbes des figures 148

à 153. Avec un commutateur en 20 parties, les ondulations de la force électromotrice dans l'armature sont inférieures à 1 pour cent de la force électromotrice totale. Avec un commutateur en 36 parties, elles sont inférieures à 2 pour mille. En ce qui concerne uniquement les ondulations, c'est donc un raffinement pratiquement inutile que d'employer des commutateurs à plus de trente-six lames. Mais, ainsi que nous le verrons en examinant les phénomènes de self-induction dans les sections individuelles, d'autres raisons militent en faveur d'un nombre de sections aussi grand que possible.

En supposant maintenant que nous donnions à notre enroulement de bobine un grand nombre de sections, de telle sorte que les ondulations puissent être négligeables, quelle sera la force électromotrice totale? — Nous pouvons écrire, ainsi que nous l'avons vu, $\frac{c}{\omega}$ au lieu de $\cos \frac{c}{2}$ ou $\cotang \frac{c}{2}$, ce qui nous donne

$$E = \frac{2}{\omega} \omega \Pi A_1 \nu \frac{c}{2}.$$

Mais A_1 était la surface d'une spire, ν le nombre de spires dans une section, et $\frac{1}{2}c$ le nombre de sections dans la moitié de l'armature (c'est-à-dire de balai à balai). Par conséquent, au lieu de $A_1 \nu \frac{c}{2}$, nous pouvons écrire A , la surface de la bobine « équivalente », de sorte que notre formule devient encore

$$E = \frac{2}{\omega} \omega \Pi A,$$

ou

$$E = 4n HA,$$

comme précédemment.

Mesure de l'Ondulation.

Le degré relatif d'ondulation dans le courant fourni par une dynamo peut être relevé d'après l'effet inducteur sur un circuit voisin. Introduisons une bobine dans le circuit et disposons une seconde bobine, tout à fait indépen-

dante de la première, dans le prolongement de celle-ci, c'est-à-dire suivant le même axe, de telle sorte que le coefficient de mutuelle induction entre les bobines soit aussi grand que possible. Introduisons dans le circuit de la seconde bobine un récepteur de téléphone. Si le courant est constant dans le circuit principal, on n'entendra aucun son. S'il est ondulatoire, chaque ondulation induira un courant secondaire correspondant dans le circuit du téléphone, et l'intensité ainsi que la fréquence des ondulations pourront être estimées d'après la hauteur et la gravité du son dans le téléphone. Les ondulations du courant d'une machine Brush se dénotent aisément de cette façon. M. le professeur Ayrton a imaginé d'introduire dans le circuit d'induction secondaire un électrodynamomètre destiné à servir de « mesureur de discontinuité ».

CHAPITRE XI

THÉORIE ALGÈBRIQUE

Magneto-dynamo, ou Machine Magnéto-électrique.

Dans les équations considérées jusqu'ici, nous avons supposé que l'induit tournait dans un champ magnétique dont l'intensité était représentée par le symbole H , indiquant le nombre moyen de lignes de force par centimètre carré dans le champ. Nous n'avons rien spécifié comme genre d'inducteurs; la formule générale précédemment déduite s'applique donc naturellement à tous les systèmes inducteurs pourvu que la valeur de leur champ magnétique soit connue. Dans les machines magnéto-électriques, dont le champ inducteur est constitué par des aimants permanents en acier, H dépend uniquement de l'aimantation de l'acier, excepté quand les bobines d'induit sont le siège d'un courant intense, auquel cas l'aimantation due au courant dans ces bobines réagit sur le champ et modifie son intensité et sa direction. Si le magnétisme du système inducteur était assez grand, relativement à celui des bobines d'induit, pour que cette réaction fût tout à fait insignifiante, notre formule fondamentale étant

$$E = 4n HA,$$

E serait, pour une machine magnéto donnée quelconque, directement proportionnel à n , c'est-à-dire à la vitesse de rotation. Mais nous savons qu'en pratique il n'en est pas ainsi. Supposons que

nous faisons marcher une machine magnéto à la vitesse de 600 tours par minute ($n = 10$, puisqu'elle fera ainsi 10 révolutions par seconde) et qu'elle nous donne, par exemple, 17 volts de force électromotrice; dès lors, s'il n'y avait aucune réaction du fait de l'induit, à l'allure de 1200 tours par minute nous devrions avoir 34 volts. On n'y arrive jamais, en réalité, bien que dans certaines machines, telles que les machines magnétos Gramme, *type de laboratoire*, construites par Breguet (fig. 77), la proportion directe soit très approximativement atteinte, même à de beaucoup plus grandes vitesses.

Mesure de l'Intensité du Champ d'une machine Magnéto-électrique.

La mesure de H est, en réalité, facile à prendre. Le mode d'opérer a quelque analogie avec celui que nous avons indiqué pour la détermination de A; il est même plus simple.

Démontez l'armature de la machine, et placez-la, avec son axe, horizontalement, dans le plan du méridien magnétique, en un point où la valeur de la composante verticale de l'intensité du magnétisme terrestre est connue. Pour la plupart des régions de la Grande-Bretagne, on peut admettre comme valeur de l'intensité verticale du champ magnétique terrestre 0,43 C. G. S. ou unités « absolues »¹, mais cette valeur peut être très différente si l'on ne prend pas le soin de choisir un endroit éloigné de tout aimant ou masse de fer. L'armature est reliée à un galvanomètre à oscillations lentes, de la façon précédemment décrite à propos de la détermination de A. On lui fait alors faire brusquement sur elle-même une demi-révolution exacte, et l'on note la déviation δ_1 de l'aiguille du galvanomètre. En la maintenant toujours en connexion avec le galvanomètre, on la remonte ensuite dans la machine, *en ayant soin que, relativement aux lignes de force du champ magnétique des aimants, les bobines élémentaires qui lors de la première expérience, se trouvaient horizontales, se trouvent maintenant en croix avec les lignes de force du champ*, ou, en d'autres termes, que l'armature soit placée de même relativement à la direction des lignes de force du champ dans les deux cas. En faisant faire alors de nouveau à la bobine une brusque demi-révolution sur elle-même, on lira au galvanomètre une déviation δ_2 plus grande que la précédente en proportion de l'intensité plus grande du champ. Et en désignant par h_v la composante verticale de l'intensité du magnétisme terrestre, on obtiendra l'intensité H du champ de la machine, par une simple règle de trois :

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{h_v}{H} .$$

1. Ce qui équivaut à 0,000 000 0043 gauss, suivant la définition de la Note 3, p. 193. Elle est à Paris de 0,4222 unités C. G. S. ou 0,000 000 004 222 gauss.

Potentiel aux bornes d'une machine Magnéto-électrique.

Le potentiel aux bornes d'une machine magnéto — comme de toute machine dynamo — est, quand la machine fonctionne, inférieur à la force électromotrice totale induite E , attendu qu'une partie de E est employée à faire passer le courant à travers la résistance de l'armature. Le symbole e s'emploie généralement pour représenter la différence de potentiel entre les bornes. Si le circuit extérieur est ouvert, de telle sorte qu'il n'y ait pas de courant produit, alors seulement $e = E$. Il est commode d'avoir une expression de e en fonction des autres quantités, car on voit que, lorsqu'il y a production de courant, il est impossible de mesurer E directement à l'aide d'un volt-mètre ou d'un électromètre, tandis que e peut toujours se mesurer ainsi.

Soit r_a la résistance intérieure de la machine, c'est-à-dire la résistance des bobines d'induit et de toute autre partie en circuit entre les bornes; et soit R la résistance du circuit extérieur. D'après la loi d'Ohm, si i est l'intensité du courant,

$$E = i(r_a + R).$$

Mais, d'après la loi d'Ohm également, si e est la différence de potentiel entre les bornes de la partie du circuit dont la résistance est R ,

$$e = iR;$$

d'où

$$\frac{e}{E} = \frac{R}{r_a + R}; \quad \text{[III.]}$$

ce qui nous donne

$$e = \frac{R}{r_a + R} E,$$

ou

$$e = \frac{R}{r_a + R} 4n \Pi A. \quad \text{[IV.]}$$

Il est bon de se rappeler également que

$$E = \frac{r_a + R}{R} e; \quad \text{[V.]}$$

car cette formule permet de calculer la valeur de E d'après les valeurs de e relevées sur un volt-mètre.

Dynamo à Excitation indépendante.

Les formules applicables aux magneto-dynamos subsistent pour les dynamos à excitation séparée; il faut toutefois se rappeler ici que H n'est plus constant, mais qu'il dépend de l'intensité du courant d'excitation extérieur et est, si les noyaux de fer des électro-aimants sont loin de leur point de saturation, très sensiblement proportionnel à cette intensité du courant d'excitation.

Dans l'estimation du rendement net (ou commercial) d'une dynamo à excitation indépendante, il faut tenir compte de l'énergie dépensée par seconde pour exciter les électro-aimants.

CHAPITRE XII

THÉORIE ALGÈBRIQUE

Rendement et Coefficient économique des machines dynamos.

Supposons que nous connaissions le nombre de chevaux-vapeur mécaniques réellement employés à actionner une dynamo. Cette force peut se mesurer directement, soit à l'aide d'un « dynamomètre de transmission », soit d'après des diagrammes fournis par la machine motrice, ou bien encore, dans certains cas spéciaux où les électro-aimants peuvent être montés sur pivots et équilibrés, en appliquant la méthode primitivement suivie par le Révérend F. J. Smith, et décrite plus tard par M. Marcel Deprez et par le professeur Brackett, méthode dans laquelle on utilise réellement la réaction mécanique mutuelle des inducteurs et de l'induit pour mesurer la force mécanique employée à produire le mouvement. Si donc nous connaissons la force mécanique absorbée et que nous mesurions « l'activité » de la dynamo, c'est-à-dire le taux auquel elle fournit l'énergie électrique, ou, comme disent les Anglais, son *output* de puissance électrique, nous aurons, en comparant la force mécanique absorbée et l'activité électrique développée, une mesure du « rendement » de la dynamo considérée au point de vue économique comme transformateur d'énergie mécanique en énergie électrique. Il faut naturellement se bien pénétrer de ce fait, qu'une partie de l'énergie électrique développée est forcément consommée dans la machine elle-même, en conséquence de la résistance inévitable du fil de l'induit, et, dans le cas des machines auto-exci-

tatrices, du fil des inducteurs. Il est donc nécessaire d'établir une distinction entre le rendement brut de la machine, ou, comme on dit quelquefois, son « rendement de transformation électrique », et son rendement net, ou « rendement commercial utile ».

Pour exprimer le rendement, brut ou net, il nous faut cependant, avoir le moyen de mesurer « l'activité » électrique de la dynamo, ou d'une partie quelconque de son circuit.

Tout le monde sait qu'on peut donner l'expression de l'énergie, par seconde, d'un courant, à la condition de connaître deux choses, savoir l'intensité du courant en ampères, et la différence de potentiel en volts entre les deux extrémités de la partie du circuit dans laquelle se dépense l'énergie à mesurer. Le nombre d'ampères se mesure à l'aide d'un ampère-mètre; le nombre de volts, avec un volt-mètre. Le produit des volts par les ampères est l'expression de l'énergie électrique dépensée par seconde, en fonction de l'unité d'activité appelée « watt ». Un cheval-vapeur étant égal à 736 watts, le nombre de volts-ampères (c'est-à-dire de watts) doit être divisé par 736 pour donner le résultat en chevaux-vapeur. Si i représente le courant en ampères, et e la différence de potentiel en volts, « l'activité » ou « l'énergie électrique par seconde », pour laquelle nous emploierons le symbole w , peut s'écrire

$$w = \frac{ei}{736}.$$

Maintenant nous savons que, pour toute dynamo, l'énergie électrique utilement développée dans le circuit extérieur *n'est pas* la totalité de l'énergie électrique de la machine; une partie de cette dernière est absorbée (et dépensée en production de chaleur) dans les résistances des inducteurs et de l'induit. Le rapport de l'énergie électrique utile disponible dans le circuit extérieur à l'énergie électrique totale développée est quelquefois appelé, quoique improprement, le « rendement électrique » de la machine. Je préfère appeler ce rapport le « coefficient économique » de la machine. Il peut s'exprimer algébriquement de la manière suivante : — Si la machine donne un courant de i ampères et si sa force électromotrice totale est de E volts, son *activité électrique totale* sera

$$= Ei \text{ watts.}$$

Si la différence de potentiel entre les bornes de la dynamo est de e volts, l'*activité utile* est

$$= ei \text{ watts.}$$

En employant le symbole η pour le « coefficient économique » ou ce qu'on appelle le « rendement électrique, » nous avons

$$\eta = \frac{\text{activité utile}}{\text{activité totale}} = \frac{ei}{Ei}$$

ou

$$\eta = \frac{e}{E}.$$

Mais nous savons que le rapport $\frac{e}{E}$ dépend de la relation des résistances intérieure et extérieure, car

$$\frac{e}{E} = \frac{R}{r_a + R}, \quad (\text{équation [III.]})$$

R représentant la résistance du circuit extérieur, et r_a la résistance intérieure (inducteurs, induit, etc...) de la machine.

D'où

$$\eta = \frac{R}{r_a + R}. \quad \text{[VI.]}$$

Naturellement, ce coefficient se rapprochera d'autant plus de l'*unité* que la valeur de r_a pourra être diminuée. Car si la machine pouvait être construite sans *aucune* résistance, il n'y aurait pas d'énergie dépensée à faire passer le courant dans l'induit et consommée en échauffement de ses bobines.

Nous verrons plus loin comment l'expression du coefficient économique η doit être modifiée dans le cas des machines dynamos montées en série et des machines en dérivation. L'expression ci-dessus suffit à la fois pour les machines magnétos et celles à excitation indépendante.

Revenant maintenant au rendement réel de la machine, employons le symbole W pour le travail mécanique par seconde, ou le nombre de chevaux-vapeur réellement employé à actionner la ma-

chine. Si nous nous rappelons que l'activité brute de la machine est $\frac{Ei}{736}$, nous avons pour le *rendement brut*, ou rendement de transformation électrique,

$$\frac{Ei}{W \times 736}$$

et pour le *rendement net*, ou rendement commercial utile,

$$\frac{ei}{W \times 736}$$

On voit que, la première de ces expressions contenant E, et la seconde e, le rendement net peut se déduire du rendement brut en multipliant ce dernier par η , c'est-à-dire par le coefficient économique.

Avant de quitter cette question, il est bon de remarquer que, du moment où l'intensité i du courant entre comme facteur dans chacune des expressions de rendement, i ne dépendant pas seulement de la résistance de la machine elle-même, mais de celle des lampes et des autres parties du système qu'elle doit alimenter, il y a quelque chose de confus à parler du rendement de la *dynamo*, comme si le rendement était une propriété de la machine. Par contre, non seulement le rendement brut, mais aussi le coefficient économique, et par suite *a fortiori* le rendement net, dépendent de la résistance extérieure, c'est-à-dire du nombre de lampes qui peuvent se trouver en action. Il y a cependant un sens dans lequel cette expression peut se justifier. Toute dynamo est calculée pour alimenter un certain nombre de lampes, par exemple, et par suite pour fournir une certaine moyenne de courant. Son rendement et son coefficient économique doivent, par conséquent, être exprimés en fonction du courant (et de la résistance extérieure) qui peut être considéré comme le régime normal de la machine.

Variation du Coefficient économique suivant le Courant.

On remarquera que, dans le cas de la machine en série considéré ci-dessus, la valeur de η est différente selon qu'on fait varier

la résistance extérieure R . Quand R est très grand relativement à r_a , alors la valeur de η est très sensiblement $= 1$; mais, pour de petites valeurs de R , la valeur de η diminue indéfiniment. Or, quand R est grand, le courant est faible, et quand R est faible, le courant est intense. On voit par là que, pour une dynamo en série, la valeur maxima du coefficient économique correspond au cas où la machine effectue son travail minimum. On trouvera au Chapitre XVII une courbe (fig. 199) qui met cette relation en évidence.

Relation entre les Dimensions et le Rendement d'une machine.

Toute circonstance qui contribue à consommer l'énergie du courant dans une machine dynamo-électrique diminue le rendement de cette machine. Nous avons indiqué dans les chapitres précédents quelles sont les principales causes de consommation d'énergie et comment on peut les écarter. Nous avons examiné en détail les précautions à prendre pour empêcher le développement des courants parasites, pour prévenir les renversements d'aimantation, pour supprimer les résistances inutiles et obvier aux forces électromotrices inverses. Les frottements mécaniques des parties mobiles peuvent aussi être réduits par des dispositions mécaniques convenables; mais il est un élément dont on ne peut complètement éliminer les effets : c'est la résistance inhérente aux meilleurs conducteurs eux-mêmes. L'échauffement des spires conductrices est inévitable, et, plus le courant produit par la machine est considérable, plus cette source de dépense d'énergie prend d'importance. Il n'existe qu'un seul moyen de l'atténuer, c'est d'augmenter les dimensions des machines. Depuis plusieurs années je n'ai pas cessé de plaider la cause des machines dynamos de grandes dimensions. Ce n'est pas que j'aie la moindre admiration pour les gros outils en eux-mêmes; mais il en est des dynamos comme des machines à vapeur : les fortes machines fournissent un meilleur rendement que les petites, relativement à leur prix de revient.

Dans l'étude du rapport entre les dimensions des machines et leur rendement, j'admettrai qu'on peut augmenter les dimensions d'une machine quelconque n fois dans tous les sens, et je suppo-

serai que, malgré cette augmentation, la vitesse de rotation reste la même et que l'intensité du champ magnétique, par centimètre carré, reste également constante.

Si l'on prend une machine et qu'on augmente n fois ses dimensions linéaires, elle occupera une surface n^2 fois aussi grande, et son volume, ainsi que son poids, deviendront n^3 fois aussi considérables. Son prix de revient sera moins de n^3 fois, mais plus de n fois aussi grand. L'application de la même loi d'accroissement aux dimensions des bobines élémentaires de l'induit (le nombre des couches et celui des spires restant les mêmes) donnera aux spires de l'induit une longueur de fil n fois égale, et la section transversale du fil sera n^2 fois celle de la machine primitive. La résistance de ces bobines sera, par suite, $\frac{n}{n^2}$ ou $\frac{1}{n}$ seulement de ce qu'elle était d'abord. Si les bobines des inducteurs sont modifiées de même, elles n'auront plus que $\frac{1}{n}$ de la résistance antérieure. Comme, d'ailleurs, la vitesse de rotation reste la même, la surface coupée par le système mobile sera multipliée par n^2 , et, dès lors, n^2 fois autant de lignes de force se trouveront coupées dans le même temps, c'est-à-dire que la force électromotrice sera n^2 fois aussi grande. Si le circuit total reçoit dans tous les sens la même augmentation, sa résistance se trouvera également réduite à $\frac{1}{n}$ de sa valeur primitive.

Si la machine est une dynamo « montée en série », une force électromotrice n^2 agissant à travers une résistance $\frac{1}{n}$ donnera un courant n^2 fois aussi grand que précédemment. Un courant de cette intensité sera, comme le prouve l'expérience, beaucoup plus que suffisant pour porter le champ magnétique à l'intensité voulue, c'est-à-dire pour donner à n^2 fois la même surface magnétique la même intensité moyenne par centimètre carré, suivant les données du problème; car la masse de fer étant n^3 fois aussi considérable n'a pas besoin d'être saturée au même degré que précédemment pour fournir le champ magnétique demandé. On peut donc réaliser ici une économie en diminuant encore le nombre des spires, et, par suite, la résistance coûteuse des inducteurs, dans la proportion de

$\frac{n^2}{n^3}$, soit à $\frac{1}{n}$ de sa valeur déjà réduite. Mais, quand même on n'opérerait pas cette réduction, d'après la formule donnée plus haut pour le coefficient économique d'une dynamo « en série », la consommation, pour cette machine fonctionnant sur une résistance extérieure constante, sera n fois moindre que précédemment. Or l'intensité du courant devenant n^3 fois et la force électromotrice n^2 fois aussi grande, l'activité électrique totale, qui est le produit de ces deux facteurs, sera n^5 fois égale à l'activité antérieure, et il faudra dépenser n^5 fois autant de force pour actionner la machine¹.

Il y a évidemment une économie considérable à employer une machine qui, coûtant moins de n^3 fois le prix d'une autre, est susceptible d'effectuer un travail n^5 fois aussi élevé (sans parler de l'accroissement du rendement). Une machine dont toutes les dimensions linéaires sont doublées ne coûte pas huit fois autant,

1. Ce calcul concorde avec le résultat déduit de principes absolument différents par M. Marcel Deprez. M. Deprez considère la réaction mutuelle dF de deux éléments ds et ds' d'un système de conducteurs représentée, d'après la formule d'Ampère, par

$$dF = I^2 \frac{ds ds'}{r^2} f(x),$$

équation dans laquelle I est l'intensité du courant, r la distance qui sépare les éléments, et $f(x)$ une certaine fonction de la machine, indépendante de ses dimensions. En désignant la surface par a , et le volume par v , on a

$$\begin{aligned} dF &= \frac{I^2}{a^2} \cdot \frac{ads \cdot ads'}{r^2} \cdot f(x) \\ &= \frac{I^2}{a^2} \cdot \frac{dv \cdot dv'}{r^2} \cdot f(x), \end{aligned}$$

qui, si les dimensions linéaires sont multipliées par n , devient

$$\begin{aligned} dF' &= \frac{I^2}{a^2} \cdot \frac{n^3 dv \cdot n^3 dv'}{n^2 r^2} \cdot f(x) \\ &= n^4 dF, \end{aligned}$$

d'où, puisqu'il en est de même pour tous les éléments des circuits,

$$\frac{F'}{F} = n^4.$$

Cette relation, que M. Deprez a nommée « loi des similitudes », exprime que, pour des machines semblables, « l'effort statique » croît comme la quatrième puissance des dimensions linéaires. Mais le travail $W = F \times$ la distance parcourue, et, dans la machine semblable, dont les dimensions sont augmentées n fois, la longueur moyenne de parcours du point d'application de la force F' est également n fois aussi grande; — d'où $\frac{W'}{W} = n^5$, comme ci-dessus.

et est, au point de vue électrique, théoriquement trente-deux fois aussi puissante.

Dans la pratique on ne peut pas arriver à ce résultat, parce que, le fer devant être aimanté par l'extérieur, les masses de fer plus considérables dans les grandes machines demandent relativement plus d'énergie électrique pour être aimantées au même degré. On peut admettre comme règle que la puissance d'action est à peu près proportionnelle au poids de la machine, et qu'elle est même plutôt supérieure à n^3 pour une machine de n fois les mêmes dimensions linéaires.

Supposons maintenant la machine montée « en dérivation » ; pour produire un champ magnétique de surface égale à n^2 fois autant de centimètres carrés, l'intensité absolue du courant devra (si la force électromotrice est n^2 fois aussi grande) rester la même que précédemment dans les bobines inductrices. On peut obtenir ce résultat en conservant au fil la même section et en lui donnant une longueur n^2 fois aussi grande, de manière à loger n fois autant de tours de n fois le même diamètre chacun en un même nombre de couches sur les bobines. Dans ce cas, le travail effectué dans la dérivation étant représenté par le produit d'une force électromotrice n^2 fois égale par l'intensité du courant qui n'a pas varié sera seulement n^2 fois aussi considérable, tandis que le travail total de la machine sera devenu n^5 fois égal au précédent. Maintenant, si, tout en multipliant par n^5 la valeur du travail total, nous avons élevé, non pas à n^5 fois, mais à n^2 fois seulement le travail perdu, il est clair que le rapport du travail perdu au travail total a diminué dans la proportion de n^3 . Il y a, par suite, tout lieu de construire de grandes machines, en raison de l'économie réalisée, tant dans le coût relatif de première installation que dans le rendement relatif.

Désireux de prouver l'exactitude de cette déduction, que la capacité de travail d'une machine, dont les dimensions linéaires sont n fois celles d'une autre, est n^5 fois aussi considérable, j'ai construit un petit appareil représenté par la figure 154. Cet instrument est formé de deux paires de bobines, dont l'une, celle de gauche, est la reproduction exacte de celle de droite, mais de dimensions linéaires doubles. Quand les bobines sont toutes quatre parcourues par le

même courant, le point de suspension correspondant à l'équilibre de cette balance est à $\frac{1}{17}$ de la longueur totale du fléau, c'est-à-dire que l'attraction du système le plus grand est seize fois égale à celle

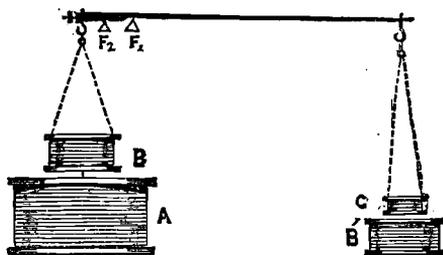


FIG. 154. — Balance expérimentale de S.-P. Thompson.

du plus petit. De plus, il est évident que la force la plus considérable peut s'exercer à une distance double ou que la puissance de

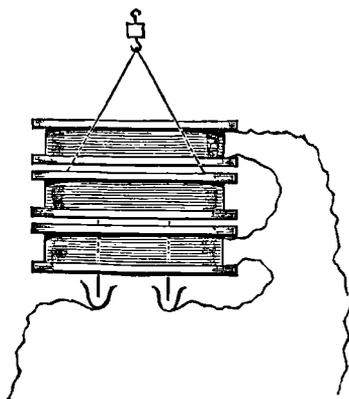


FIG. 155. — Appareil de M. Depez.

travail est trente-deux fois aussi grande; or $32 = 2^5$: c'est ce qu'indique la théorie.

Après avoir construit mon appareil, j'ai appris que M. Marcel Depez avait adopté une disposition tout à fait analogue, mais sans fléau, pour prouver que les efforts statiques de machines similaires sont proportionnels à la quatrième puissance de leurs dimensions linéaires (voir la note précédente). L'appareil de M. Depez n'était

autre chose qu'une modification de la balance de courant de Joule dans laquelle une bobine suspendue à une balance était soumise à l'action de deux autres disposées sur un axe commun, l'une au-dessus, l'autre au-dessous de la première (fig. 155). La force exercée était mesurée directement par l'addition de poids qui rétablissaient l'équilibre. A l'aide de deux systèmes identiques, mais dont l'un avait des dimensions doubles de celles de l'autre, et en opérant avec le même courant, M. Deprez a trouvé que les efforts exercés étaient respectivement dans le rapport de $\frac{5^k,600}{0^k,355}$, ou presque exactement comme 16 est à 1.

CHAPITRE XIII

THÉORIE ALGÈBRIQUE

Machine dynamo en Série ou Ordinaire

Dans la dynamo en série (fig. 156 et fig. 1), il n'existe qu'un seul circuit et, par conséquent, un seul courant dont l'intensité i dépend de la force électromotrice E et de la somme des résistances du circuit, savoir :

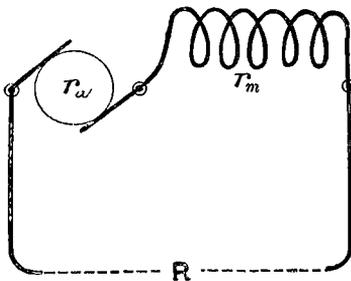


FIG. 156.

R = la résistance extérieure (variable).

r_a = la résistance de l'induit.

r_m = la résistance des inducteurs.

D'après la loi d'Ohm :

$$E = (R + r_a + r_m) i.$$

On a également pour la différence de potentiel entre les bornes de la machine

$$e = Ri.$$

Il convient, en outre, de trouver une expression de la différence de potentiel entre les balais de la machine, le nombre de volts mesuré en ces points étant ici supérieur à e à cause de la résistance des inducteurs, et inférieur à E en raison de la résistance de l'induit. Pour cette différence de potentiel entre les balais, nous emploierons le symbole ϵ . Alors, si nous nous rappelons que le

courant qui traverse r_m et R est d'intensité i , nous aurons d'après la loi d'Ohm

$$\begin{aligned}\varepsilon &= (R + r_m) i; \\ &= (R + r_m) \frac{E}{R + r_a + r_m};\end{aligned}$$

et de même

$$\begin{aligned}e &= E - (r_a + r_m) i, \\ &= \frac{RE}{R + r_a + r_m}.\end{aligned}$$

Équations de la Dynamo en Série déduites de la loi de Saturation.

Nous avons l'équation fondamentale (voir p. 192)

$$E = 4n AH.$$

Mais H est lui-même fonction de l'intensité du courant et dépend par suite de E , de la somme des résistances $(R + r_a + r_m)$, ainsi que de la quantité et de la qualité du fer constituant les noyaux des inducteurs, en tant qu'ils sont ou non aimantés à saturation; il dépend également de la forme géométrique et des dimensions des inducteurs, de leurs bobines et de leurs pièces polaires. Il dépend encore, bien qu'à un point de vue secondaire, de l'aimantation de l'induit et de l'effet produit par celle-ci quant à la modification de la direction du champ total, ainsi que du « calage » résultant des balais. Nous nous contenterons, quant à présent, d'une première approximation dans laquelle nous laisserons momentanément de côté ces actions secondaires. Les équations subsistent bien encore dans ce dernier cas; elles exigent seulement, quand on en tient compte, une interprétation un peu plus simple des symboles.

Nous avons donc à trouver une expression du champ magnétique H en fonction du courant i qui excite ce champ magnétique, et des coefficients géométrique et magnétique des inducteurs. Nous savons que, pour un inducteur de forme donnée *quand il n'est pas*

aimanté à un point voisin de la saturation, l'intensité du champ est très sensiblement proportionnelle au courant d'aimantation et au nombre de spires de sa bobine. Nous savons également que, par suite de la saturation de l'inducteur, l'intensité du champ est, pour des courants très intenses, presque constante. MM. Robinson, Frölich et autres savants ont donné des formules dans lesquelles ils ont introduit un terme de saturation. Si nous prenons la forme suggérée par le D^r Frölich pour les moments magnétiques, soit

$$M = \frac{ai}{1 + si},$$

dans laquelle a est une certaine constante d'aimantation, et s une petite constante fractionnaire dépendant de la saturation du noyau, nous trouverons qu'elle répond dans sa forme générale à notre but, tout en exigeant quelque développement dans le cas qui nous occupe. Nous devons, en réalité, y ajouter des termes donnant l'expression des actions complémentaires dont nous avons à tenir compte. Soit Y le nombre de spires des bobines inductrices; Yi représentera le nombre d'ampères-tours¹, ou, en d'autres termes, l'action magnétisante du courant dans les bobines. L'aimantation déterminée par cette action magnétisante dépend de la perméabilité magnétique du fer du noyau, de sa section, etc. Désignons par κ , comme d'habitude, cette perméabilité magnétique (ou le *coefficient d'induction magnétique*). κ n'est pas constant: il a une certaine valeur initiale, mais il croît de moins en moins à mesure que l'électro-aimant se sature, et il se réduit finalement à l'unité. Sa valeur effective s'exprime parfaitement par l'introduction d'un facteur de saturation de la manière suivante: divisons-le par un terme formé de l'unité + les ampères-tours multipliés par une constante de saturation que nous appellerons σ et qui est une petite fraction².

Il nous vient ainsi, au lieu de κ simplement, $\frac{\kappa}{1 + \sigma Yi}$ pour facteur effectif de perméabilité magnétique.

Nous avons encore à introduire une autre constante que nous appellerons G ; c'est une quantité purement géométrique³ qui dépend

1. Nous n'hésitons pas, ainsi que nous l'avons dit, à franciser l'expression anglaise *ampère-turn* qui satisfait pleinement et simplement à la désignation concise du produit ni d'un nombre de spires par le courant qui les parcourt.

2. Voir la note, p. 233, sur le coefficient de saturation « σ ».

3. Voir la note, p. 235, sur le coefficient « G ».

uniquement de la section transversale du noyau et des bobines, de la longueur et de la forme des inducteurs et de leurs pièces polaires.

En réunissant tous ces termes dans l'expression de II nous avons, en conséquence,

$$H = G Y i \frac{x}{1 + \sigma Y i},$$

qui nous donne pour équation primaire de la dynamo en série

$$E = 4n A G Y i \frac{x}{1 + \sigma Y i}. \quad [\text{VII.}]$$

Maintenant, i étant lui-même fonction de E , si nous le remplaçons par sa valeur en chassant le dénominateur dans l'équation précédente, nous avons

$$E \left(1 + \sigma Y \frac{E}{R + r_a + r_m} \right) = 4n A G x Y \frac{E}{R + r_a + r_m};$$

ou

$$\sigma Y \frac{E}{R + r_a + r_m} = \frac{4n A G x Y}{R + r_a + r_m} - 1;$$

d'où

$$E = \frac{R + r_a + r_m}{\sigma} \left\{ \frac{4n A G x}{R + r_a + r_m} - \frac{1}{Y} \right\}, \quad [\text{VIII.}]$$

ce qui peut encore s'écrire : —

$$E = \frac{1}{\sigma} \left\{ 4n A G x - \frac{R + r_a + r_m}{Y} \right\}. \quad [\text{VIII}a.]$$

Nous avons d'ailleurs, d'après les valeurs de e et de ε précédemment déduites en fonction de E

$$\varepsilon = \frac{R + r_m}{\sigma} \left\{ \frac{4n A G x}{R + r_a + r_m} - \frac{1}{Y} \right\}, \quad [\text{IX.}]$$

et

$$e = \frac{R}{\sigma} \left\{ \frac{4n A G x}{R + r_a + r_m} - \frac{1}{Y} \right\}. \quad [\text{X.}]$$

Équation du Courant d'une Dynamo en Série.

Il est utile d'ajouter aux équations précédentes une expression de l'intensité du courant. Du moment où

$$i = \frac{e}{R} = \frac{E}{R + r_a + r_m},$$

nous obtenons de suite

$$i = \frac{1}{\sigma} \left\{ \frac{4n A G z}{R + r_a + r_m} - \frac{1}{Y} \right\}. \quad [\text{XI.}]$$

Il résulte de là que le courant ou la force électromotrice peuvent se déduire immédiatement de la connaissance des constantes A , G , z , Y , σ , r_a et r_m pour toutes valeurs données des variables n et R .

Détermination des Constantes de la Dynamo en Série.

Y , le nombre de spires des bobines d'électro-aimants doit être indiqué par le constructeur sur la machine ou peut être estimé après coup.

r_a et r_m sont des résistances qui peuvent être mesurées soit par la méthode ordinaire du pont de Wheatstone, soit par la détermination de la chute de potentiel entre les extrémités de l'une et de l'autre quand elles sont parcourues par un courant d'intensité connue; car, d'après la loi d'Ohm, les volts divisés par les ampères dans le conducteur donnent la résistance en ohms.

A , la constante d'armature ou surface de la bobine équivalente, peut être déterminée par la méthode précédemment décrite page 196.

z , la perméabilité magnétique, et σ , la constante de saturation, peuvent également être déterminées par le procédé expliqué page 233.

G , la constante géométrique des électro-aimants, peut être déterminée séparément, pourvu qu'on connaisse z . Ou bien le produit $G z$ peut être déterminé dans son ensemble. $G z$ est la

même chose que H pour un ampère-tour ; aussi un ampère-tour du courant exciteur n'aimante-t-il pas à beaucoup près l'électro-aimant à saturation. Or $H = \frac{Gz \ Y i}{1 + \sigma Y i}$, et par suite pour un am-

père-tour, $H = \frac{Gz}{1 + \sigma}$. Mais σ est une très petite fraction et peut

en conséquence être négligé pour une action magnétisante aussi faible que celle d'un ampère-tour. Pour obtenir Gz , il suffit donc de lancer un *très* faible courant dans les électro-aimants et de prendre la valeur H ainsi développée, d'après le procédé décrit page 211. En divisant cette valeur de H par les ampères-tours du faible courant d'excitation, on obtient Gz . La meilleure manière de déterminer pratiquement Gz paraît être de déterminer toutes les autres constantes à l'exception de G et de z . On détermine ensuite i ou bien e pour une certaine valeur du courant, et on calcule Gz d'après l'équation complète. En fait, on n'a jamais besoin de G et de z séparément : ils peuvent donc aussi bien être déterminés conjointement.

Coefficient économique de la Dynamo en Série.

De la loi de Joule relative à l'énergie du courant il résulte que le coefficient économique η , qui est le rapport de l'énergie électrique utile disponible dans le circuit extérieur à l'énergie électrique totale développée sera

$$\eta = \frac{\text{travail utile}}{\text{travail total}} = \frac{i^2 R t}{i^2 (R + r_a + r_m) t} = \frac{e}{E},$$

ou

$$\eta = \frac{R}{R + r_a + r_m}. \quad [\text{XII.}]$$

Cette expression est évidemment maxima quand $r_a + r_m$ sont *tous deux* très petits. Sir W. Thomson recommande de faire r_m un peu plus petit que r_a . Le rapport de 2 à 3 est une bonne proportion.

Comme exemple, je citerai le résultat d'épreuves faites à Munich sur une dynamo Bürgin-Crompton dont le coefficient économique variait, suivant les résistances extérieures, entre 62,5

et 70, 8 pour cent : — $r_a = 2,14$ ohms, $r_m = 1,78$ ohm. Ici la résistance des inducteurs était égale aux cinq sixièmes environ de celle de l'induit.

*Détermination pratique de l'Enroulement des Bobines
d'Électro-aimants.*

Supposons qu'une dynamo étant construite et l'armature étant déjà garnie de fil il ne reste plus qu'à mettre le fil sur les électro-aimants. La question à résoudre est la détermination du nombre de spires qu'il faut mettre sur ces bobines de telle sorte que, à une certaine vitesse, et avec une résistance extérieure donnée (par exemple un certain nombre de lampes à incandescence), la force électromotrice atteigne le nombre de volts voulu. On peut faire usage de la méthode suivante, mais elle exige l'emploi d'une puissante source extérieure de courant — telle qu'un petit nombre de bons accumulateurs ou une autre dynamo. Enroulez provisoirement quelques spires de fil sur les noyaux des électro-aimants. Le nombre de tours dans cette expérience doit être compté exactement; mais il peut être inférieur à celui qui sera définitivement nécessaire à la machine. Excitez séparément les électro-aimants en lançant, dans ces bobines provisoires, le courant des accumulateurs et introduisez dans le circuit excitateur un ampère-mètre et une résistance variable convenable. Reliez les balais de la machine par des fils de résistance représentant les lampes, en prenant naturellement assez de fil pour amener la résistance du circuit à sa valeur déterminée. Faites tourner l'armature exactement à la vitesse de régime à laquelle elle doit définitivement fonctionner. Revenant alors au courant d'excitation, augmentez-le graduellement jusqu'à ce que la force électromotrice de la machine arrive à la valeur voulue. Le nombre d'ampères du courant d'excitation multiplié par le nombre de spires des bobines provisoires fournira *exactement* le nombre d'ampères-tours nécessaire pour donner aux noyaux des électro-aimants le degré d'aimantation voulu. Partant de cette simple expérience, on peut calculer, de la manière suivante, le nombre de spires à mettre finalement sur les bobines. On connaît le nombre d'ampères qui doit alimenter les lampes. Divisez le nombre d'ampères-tours précédemment trouvé par le nombre d'ampères que doit fournir la machine; le quotient donnera le nombre des spires dont doivent être garnies les bobines définitives. Il ne reste plus qu'à déterminer le diamètre du fil à employer. Il ne faut pas oublier, comme règle, que la résistance des bobines d'électro-aimants d'une dynamo en série doit être un peu inférieure à celle de l'armature, soit égale aux deux tiers de celle-ci. Mesurez alors la circonférence des noyaux des électro-aimants et calculez la longueur moyenne d'un tour de fil autour du noyau : appelons-la λ . Nous savons qu'il doit y avoir Y tours, chacun de longueur λ . La longueur totale du fil doit donc être $Y\lambda$, et sa résistance seulement $\frac{2}{3}r_a$, c'est-à-dire que le diamètre du fil doit être tel que

$$\text{sa résistance par unité de longueur } \rho = \frac{2r_a}{3Y\lambda}.$$

Si λ est exprimé en mètres, il suffira de se reporter à une table de jauge de fils (telle qu'en fournissent tous les fabricants de fils) donnant la résistance par mètre (ou par kilomètre) des différents diamètres ; on trouvera de suite le diamètre correspondant à la résistance voulue.

Nous n'avons tenu ici aucun compte de ce fait extrêmement important que, s'il y a plusieurs couches de fil sur les électro-aimants, les spires extérieures sont plus longues (et offrent par suite plus de résistance par tour) et qu'elles n'ont pas une action magnétisante tout à fait aussi énergique que les spires plus voisines du noyau. Dans ce cas, le nombre de tours de fil devra dépasser le nombre calculé dans l'hypothèse que tous les tours ont le même pouvoir magnétisant. L'expérience indiquera la moyenne de λ à prendre pour arriver à un résultat aussi exact que possible.

Avant de quitter ce sujet, on peut remarquer qu'il existe une relation très importante entre la force électromotrice utile e et le nombre de tours Y dans les bobines d'électro-aimants. S'il n'y avait pas de limite de saturation, e serait directement proportionnel à Y , à la condition de pouvoir augmenter Y sans modifier r_m . Mais, même en tenant compte du facteur de saturation et en augmentant Y et r_m par l'addition de nouvelles spires sur l'électro-aimant, on améliore encore la valeur de e . On voit en effet, en considérant l'équation N° [X.], que, si Y et r_m doublent de valeur, le second terme diminue plus que le premier, et par suite la valeur de e se trouve augmentée. Une grande augmentation de r_m abaisserait cependant le coefficient économique de la machine.

Importance du Coefficient de Saturation.

Le coefficient de saturation σ a une importance capitale ; c'est, en effet, l'élément principal de la valeur de la force électromotrice d'une dynamo comprenant un nombre déterminé de spires, etc., et pour des résistances et une vitesse données. En se reportant aux équations de la force électromotrice N°s [VIII.], [IX.], et [X.], page 227, on voit que, plus σ est petit, plus, toutes choses égales d'ailleurs, la force électromotrice est considérable. Il est donc extrêmement important non seulement de donner à la machine une forme telle que G soit élevé, et d'employer du fer assez doux pour que z ait une grande valeur ; mais encore d'y mettre *assez de fer* pour que le coefficient de saturation soit très petit : ou, en d'autres termes, assez de fer pour qu'il faille un nombre considérable d'ampères-tours pour l'aimanter à saturation.

Voyons ce qui arriverait s'il n'existait pas de coefficient de saturation. Supposons exacte l'explication, qui avait cours il y a quinze ans, du mode de fonctionnement des dynamos d'invention toute

récente à cette époque ; la réaction entre les bobines des inducteurs et de l'induit revenait, disait-on, à une loi d'intérêts composés, l'électro-aimant déterminant le courant, le courant exaltant le magnétisme de l'électro-aimant, ce dernier, devenu plus puissant, rendant le courant encore plus intense, et ainsi de suite. Évidemment s'il n'intervenait aucune loi de saturation, une dynamo devrait, à une vitesse de rotation donnée quelconque, présenter une force électromotrice croissant sans limite depuis zéro jusqu'à l'infini. De même, supprimons de l'équation primitive [VII.], page 227, le terme de saturation ; elle devient

$$E = 4n A G z Y i,$$

qui peut également s'écrire

$$E = \frac{4n A G z Y E}{R + r_a + r_m},$$

équation d'après laquelle la valeur de E est indéterminée, puisqu'elle subsisterait encore comme équation pour toute valeur de E comprise entre $+\infty$ et $-\infty$; ce qui est absurde. Nous savons également par expérience que, dans une machine construite sans apparence de fer, l'intérieur de ses bobines étant uniquement occupé par l'air, de telle sorte que $z = 1$ (c'est-à-dire qu'il n'y a pas de saturation magnétique), la force électromotrice n'atteint pas à beaucoup près la même valeur que si la machine était pourvue de fer. D'autres réactions, telles que les phénomènes de self-induction dans les sections de l'induit, la torsion du champ magnétique résultant, l'importance relativement plus grande des frottements, l'échauffement des résistances, etc., viennent, en réalité, lui faire obstacle et assignent une limite pratique à l'élévation de la force électromotrice. En fait, la dernière action seule — l'échauffement des fils — introduit pratiquement un nouveau terme de saturation ; la résistance entrant comme diviseur dans l'équation n'est pas, en effet, $R + r_a + r_m$, mais $(R + r_a + r_m) \times (1 + \alpha\theta)$, α étant le coefficient d'accroissement de résistance par degré de température, et θ la température à laquelle s'élève le fil sous l'action du courant, quantité qui est elle-même fonction non pas du courant, mais de son carré et qui, par suite, constitue un terme dont l'importance aug-

mente énormément quand le courant arrive à des valeurs élevées. L'expérience indique l'emploi du fer, en dépit de la limite imposée à son aimantation par la saturation, uniquement en raison de ce que, pour obtenir avec du fer le champ magnétique d'intensité voulue, il faut dépenser moins d'énergie électrique dans les bobines magnétisantes que si elles ne contenaient pas de fer. Dans ce dernier cas, il faudrait soit plus de tours, soit plus d'ampères, soit les deux à la fois dans les bobines magnétisantes, ce qui entraînerait comme conséquence la dépense d'une plus grande quantité de l'énergie fournie par la dynamo pour sa propre excitation. Il est donc extrêmement important, au point de vue économique, de choisir un fer pour lequel κ ait une haute valeur, de lui donner une forme telle que G soit aussi grand que possible, et d'en mettre en outre assez pour que le coefficient de saturation σ soit *petit*.

NOTE SUR LE COEFFICIENT DE SATURATION « σ ».

Nous avons trouvé commode de représenter le degré d'aimantation du champ d'un électro-aimant par une modification de la formule de Frölich, que nous avons écrite (p. 227) —

$$H = G Y i \frac{\kappa}{1 + \sigma Y i},$$

et dans laquelle le terme $1 + \sigma Y i$, désigné sous le nom de « terme de saturation », est introduit pour exprimer le défaut de proportionnalité que l'on constate entre i et H pour de hautes valeurs de i . Si ce défaut de proportionnalité ne se présentait pas; si le fer n'arrivait pas « à saturation », l'équation se réduirait alors à

$$H = G \kappa' Y i,$$

où κ' serait le coefficient permanent de perméabilité magnétique. Mais, à proprement parler, un terme de saturation ne peut s'appliquer ni à G , ni à Y , ni à i , aucun de ces facteurs ne subissant de diminution quand le fer approche de la saturation. Le terme de saturation doit donc appartenir à κ' seulement. En réalité, si κ' n'est pas constant, mais est représenté par la fonction

$$\kappa' = \frac{\kappa_0}{1 + \sigma Y i},$$

où κ_0 représente la valeur initiale de κ , alors que le fer est le plus éloigné du point de saturation, la forme la plus simple de l'expression de H pourrait encore être maintenue et la valeur complexe de κ pourrait être insérée. Mais si nous employons le terme de saturation, il nous faut revenir à la première équation.

Le coefficient σ , ou « coefficient de saturation », joue un rôle si important dans les équations de toutes les dynamos qu'il n'est pas sans utilité de donner quelques explications de plus sur sa signification. Il résulte de l'examen que σ , qui est toujours une petite fraction, est la réciproque d'un certain nombre particulier d'ampères-tours. Si la perméabilité magnétique du fer est α , dès lors, à mesure que le fer s'aimante, sa sensibilité à l'aimantation va en décroissant jusqu'à ce que, pour une très grande valeur de $Y i$, $\alpha = 1$. Il y aura donc un degré particulier d'aimantation pour lequel la sensibilité du fer n'aura que la moitié de sa valeur initiale. Appelons $(Y i)'$ le nombre d'ampères-tours qui l'amène à cette condition. Il en résulte que

$$\frac{\alpha_0}{2} = \frac{\alpha_0}{1 + \sigma (Y i)'}$$

d'où

$$2 = 1 + \sigma (Y i)';$$

et

$$\sigma (Y i)' = 1,$$

d'où finalement

$$\sigma = \frac{1}{(Y i)'}$$

c'est-à-dire que *le coefficient de saturation est la réciproque du nombre d'ampères-tours qui amène l'électro-aimant au degré de saturation pour lequel sa capacité magnétique est réduite à moitié.*

On peut donner à cette expression une représentation graphique indiquée

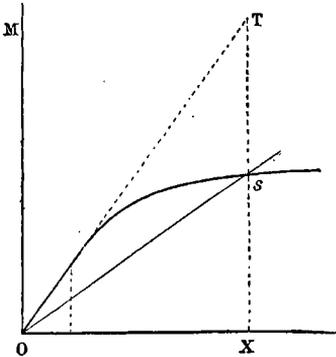


FIG. 157.

dans la figure 157. Comptons les ampères-tours sur une ligne horizontale et l'intensité de l'aimantation ou le moment magnétique sur une verticale. La courbe d'aimantation s'élève alors tout d'abord à peu près suivant une droite inclinée dont la tangente d'inclinaison est proportionnelle à α_0 , et, s'il n'y avait pas de terme de saturation quand le courant a atteint la valeur correspondant à l'abscisse OX , le magnétisme atteindrait la valeur représentée par l'ordonnée XT . Mais la saturation a commencé à entrer en jeu et la courbe s'incline en s'éloignant de OT . Menons la ligne OS suivant un angle dont

la tangente soit la moitié de celle correspondant à OT , et supposons qu'elle rencontre la courbe en S . Si l'on mène alors par le point S la ligne XT , la longueur OX représentera $(Y i)'$ ou le nombre d'ampères-tours qui réduira la perméabilité à la moitié de sa valeur initiale, et σ sera égal à $\frac{1}{O X}$. J'ai proposé d'appeler le point S pour lequel cet état de choses est obtenu, le « point critique de saturation » de l'électro-aimant.

Maintenant, dans les trois équations de la dynamo en série, nos [VIII.] à [X.],

page 227, on voit que la force électromotrice est dans chaque cas proportionnelle, non pas à σ , mais à la réciproque de σ , c'est-à-dire à $(Y i)'$. Nous pouvons dès lors exprimer cette fonction de la manière suivante : — *La force électromotrice d'une dynamo de construction donnée, tournant à une vitesse donnée, et travaillant sur des résistances données, est directement proportionnelle au nombre d'ampères-tours qui aimantera ses inducteurs au point critique de demi-perméabilité.*

Cette règle subsiste également pour les dynamos en dérivation dans lesquelles le nombre d'ampères-tours est $Z i_a$, ainsi que pour les machines *compound* dans lesquelles le nombre d'ampères-tours est $Z i_a + Y i$. La valeur de $\frac{1}{\sigma}$ pour la machine (en dérivation) Edison-Hopkinson, éprouvée par M. F. Sprague ¹, était environ 20880 ; c'est-à-dire qu'elle exigeait 20880 ampères-tours de courant pour amener les électro-aimants au point critique de demi-perméabilité, ce qui était, par le fait, très approximativement le degré réel d'aimantation obtenu quand la machine alimentait sa pleine charge de lampes.

Pour déterminer σ , il faut faire agir l'électro-aimant sur un magnétomètre (comme dans le procédé indiqué à la p. 288) et le faire exciter d'abord par un petit nombre d'ampères-tours $Y i$, puis par un courant plus intense constituant un plus grand nombre d'ampères-tours $Y i'$, en observant les déviations θ et θ' obtenues respectivement dans les deux cas au magnétomètre. On peut alors aisément démontrer que

$$\sigma = \frac{i' \operatorname{tang} \theta - i \operatorname{tang} \theta'}{(\operatorname{tang} \theta' - \operatorname{tang} \theta) i i'}$$

NOTE SUR LE COEFFICIENT « G ».

Il me paraît utile de donner quelques courtes explications sur le coefficient G que nous avons dit dépendre de la forme géométrique des électro-aimants. On démontre dans les traités sur le magnétisme que si m unités de magnétisme sont uniformément distribuées sur un pôle d'aimant de surface a , le champ extérieur qui l'entoure immédiatement a une intensité $H = 2 \pi \frac{m}{a}$. Pour un aimant droit de longueur l , le moment magnétique est d'ailleurs $M = m l$. D'où $H = \frac{2 \pi M}{a l}$. Mais dans un électro-aimant de longueur l , et de section droite a , le moment magnétique est déterminé par la formule $M = i Y a z$, dans laquelle i est l'intensité du courant, Y le nombre de tours de fil de la bobine, et z le coefficient de perméabilité magnétique du fer, qu'on ne peut supposer constant que dans le cas où le fer est loin d'être saturé, et qui autrement doit être divisé par un terme de saturation analogue à celui employé par nous (soit $1 + \sigma Y i$) dans les formules des dynamos. En remplaçant M par sa valeur, nous obtenons

$$H = \frac{2 \pi i Y}{l} z.$$

1. Voir *The Electrician*, t. XI, p. 296, 11 août 1883.

Mais nous avons admis que nous pouvions écrire pour H

$$H = G \times i Y,$$

d'où

$$G = \frac{2 \sigma}{l},$$

quantité dépendant uniquement de la longueur de l'électro-aimant. Dans le cas où les électro-aimants sont incurvés, l'expression de G est beaucoup plus compliquée, mais elle ne comprend toujours que des quantités d'ordre géométrique.

NOTE SUR LE COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ MAGNÉTIQUE « α ».

Nous avons fait observer précédemment (p. 195) que le fait d'introduire des noyaux de fer dans les bobines avait pour résultat de multiplier leur effet par un certain nombre, que nous avons symbolisé par la lettre α , et que nous avons dit varier de 2 à 50, suivant la qualité, etc., du fer. Certains ouvrages d'électricité donnent des chiffres beaucoup plus élevés pour les valeurs de « perméabilité magnétique ». Mais dans la plupart des cas où les expérimentateurs ont obtenu des valeurs plus élevées, — allant jusqu'à 20000 dans certains cas, — leurs chiffres se rapportent à la perméabilité non pas de la totalité, mais d'une certaine portion de l'inducteur telle que la partie médiane d'un long barreau droit, ou une partie d'un anneau de fer fermé. On sait d'ailleurs, d'après les expériences de Rowland, Stoletow et autres, que le coefficient de perméabilité n'est pas constant, mais que, sous un faible courant d'aimantation, il commence par croître, à mesure que le courant d'aimantation augmente, pour diminuer ensuite. Il est également affecté par les phases, en quelque sorte historiques, par lesquelles a passé l'échantillon de fer, suivant qu'il a été soumis à une traction plus ou moins forte, à un échauffement plus ou moins grand, ou à une aimantation antérieure. La perméabilité de circuits fermés de fer et de longues pièces minces est beaucoup plus considérable que celle de pièces courtes. De là l'importance qu'il y a à ce que, dans les dynamos, l'armature et les électro-aimants constituent autant que possible un circuit magnétique fermé. La valeur de α dépend en fait de G et de A à la fois. Nous avons admis, dans les équations précédentes, que les valeurs de α pour le fer de l'induit et pour celui des inducteurs pouvaient être comprises sous le même symbole. Strictement il n'en est pas ainsi; mais on ne commet pas une erreur importante en faisant cette hypothèse, parce que les quantités A, G et α se présentent communément en un seul et même produit.

CHAPITRE XIV

THÉORIE ALGÈBRIQUE

Dynamo en Dérivation.

Dans la dynamo en dérivation (fig. 158 et 2), on a deux circuits à considérer : le circuit principal et le circuit en dérivation. Les symboles employés sont les suivants :

R = résistance du circuit principal extérieur (conducteurs, lampes, etc.).

r_a = résistance de l'induit.

r_d = résistance du circuit en dérivation (bobines des inducteurs).

i = courant dans le circuit principal extérieur.

i_a = courant dans l'induit.

i_d = courant dans le circuit en dérivation.

On a évidemment

$$i_a = i + i_d;$$

attendu que le courant développé dans l'armature se partage en deux, partie dans le circuit principal, partie dans le circuit dérivé, et est égal à leur somme.

D'après la loi d'Ohm, nous avons aussi pour la différence de potentiel entre les bornes

$$e = Ri,$$

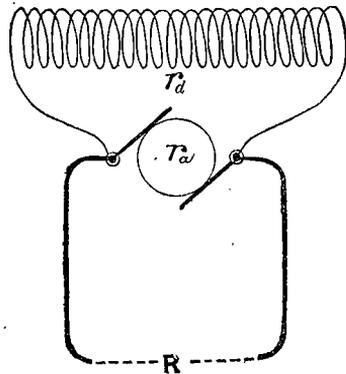


FIG. 158.

et de même

$$e = r_a i_a,$$

puisque les bornes du circuit principal sont également celles du circuit dérivé.

De plus, comme la résistance conjuguée d'un circuit ramifié est la réciproque de la somme des réciproques des résistances de ses parties, la résistance extérieure conjuguée de borne à borne est égale à $\frac{R r_d}{R + r_d}$, d'où il résulte que

$$E = \left(r_a + \frac{R r_d}{R + r_d} \right) i_a.$$

Nous pouvons en même temps trouver une expression pour la portion de la force électromotrice totale uniquement employée à vaincre la résistance de l'induit et qui est naturellement la différence entre la force électromotrice E et la force électromotrice effective e entre les bornes.

La loi d'Ohm nous donne immédiatement

$$E - e = r_a i_a,$$

ou

$$E - e = r_a (i + i_a),$$

d'où nous tirons

$$e = E - r_a (i + i_a). \quad [\text{XIII.}]$$

Nous trouverons également une expression de E en fonction de e et des diverses résistances. Prenant l'expression ci-dessus

$$E = \left(\frac{R r_d}{R + r_d} + r_a \right) i_a,$$

et remplaçant i_a par sa valeur $i + i_a$, puis chacune de ces dernières par $\frac{e}{R}$ et $\frac{e}{r_d}$, respectivement, nous obtenons

$$E = e \left\{ \frac{R r_d + R r_a + r_a r_d}{R + r_d} \times \frac{R + r_d}{R r_d} \right\},$$

ou

$$E = e \times r_a \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_d} \right).$$

**Équations de la Dynamo en Dérivation déduites de la loi
de Saturation.**

Comme précédemment, nous avons pour équation fondamentale de toute dynamo

$$E = 4n A H;$$

et nous avons à trouver pour H une expression analogue à celle trouvée dans le cas de la dynamo en série; mais avec cette différence que le courant d'aimantation est ici une petite fraction seulement i_d du courant total. Désignons par le symbole Z le nombre de tours de fil dans les bobines en dérivation; nous pouvons alors écrire

$$H = G Z i_d \frac{z}{1 + \sigma Z i_d},$$

expression dans laquelle G , z et σ ont les mêmes significations (et, pour une dynamo de construction identique, les mêmes valeurs réelles) que celles données à ces symboles dans le cas de la dynamo en série. Nous avons donc comme équations primaires pour la dynamo en dérivation,

$$E = 4n A G Z i_d \frac{z}{1 + \sigma Z i_d},$$

et, d'après l'équation [XIII.],

$$e = 4n A G Z i_d \frac{z}{1 + \sigma Z i_d} - r_a (i + i_d).$$

Cette dernière équation peut se transformer de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \{ e + r_a (i + i_d) \} \times (1 + \sigma Z i_d) &= 4n A G z Z i_d, \\ \left\{ e + r_a \left(\frac{e}{R} + \frac{e}{r_d} \right) \right\} \left(1 + \sigma Z \frac{e}{r_d} \right) &= 4n A G z Z \frac{e}{r_d}, \\ \left\{ 1 + r_a \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r_d} \right) \right\} \left(1 + \sigma Z \frac{e}{r_d} \right) &= 4n A G z Z \frac{1}{r_d}, \\ r_a \left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{R} + \frac{1}{r_d} \right) \left(1 + \sigma Z \frac{e}{r_d} \right) &= 4n A G z Z \frac{1}{r_d}, \end{aligned}$$

$$\sigma Z \frac{e}{r_a} = \frac{4n \text{ A G } z Z}{r_a r_d \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_d} \right)} - 1,$$

d'où

$$e = \frac{1}{\sigma} \left\{ \frac{4n \text{ A G } z}{r_a \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_d} \right)} - \frac{r_d}{Z} \right\}, \quad [\text{XIV.}]$$

et, en substituant cette valeur dans l'équation précédemment obtenue pour E en fonction de e,

$$E = \frac{1}{\sigma} \left\{ 4n \text{ A G } z - \frac{r_a r_d \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_d} \right)}{Z} \right\},$$

ou

$$E = \frac{1}{\sigma} \left\{ 4n \text{ A G } z - \frac{r_a r_d + R r_d + R r_a}{Z R} \right\}. \quad [\text{XV.}]$$

Il est intéressant de comparer les équations N^{os} [XIV.] et [XV.] aux équations correspondantes N^{os} [X.] et [VIII.], de la dynamo en série. Dans les deux cas, les forces électromotrices sont inversement proportionnelles au coefficient de saturation. Dans les deux cas, la différence de potentiel aux bornes serait proportionnelle à la vitesse à un terme près qui doit être soustrait et dont la valeur est le rapport des résistances déterminant le courant d'excitation au nombre des spires excitatrices. Dans les deux cas, par conséquent, ce terme nuisible disparaîtrait si le nombre des spires excitatrices pouvait être indéfiniment augmenté sans augmentation des résistances.

Équations du Courant d'une Dynamo en Dérivation.

Nous devons aussi ajouter les équations des trois courants i , i_a et i_d

$$i = \frac{r_d}{\sigma} \left\{ \frac{4n \text{ A G } z}{r_a r_d + r_a R + r_d R} - \frac{1}{Z R} \right\}. \quad [\text{XVI.}]$$

$$i_a = \frac{R}{\sigma} \left\{ \frac{4n \text{ A G } z}{r_a r_d + r_a R + r_d R} - \frac{1}{Z R} \right\}. \quad [\text{XVII.}]$$

$$i_d = \frac{R + r_d}{\sigma} \left\{ \frac{4n \text{ A G } z}{r_a r_d + r_a R + r_d R} - \frac{1}{Z R} \right\}. \quad [\text{XVIII.}]$$

Ces équations peuvent être comparées à l'équation N^o [XI.], p. 228.

Détermination des Constantes de la Dynamo en Dérivation.

Les seules constantes contenues dans les équations ci-dessus et qu'on ne rencontre pas également dans les équations de la dynamo en série, sont le nombre de spires Z et la résistance r_a des bobines en dérivation. La dernière peut se mesurer simplement comme une résistance quelconque. La première doit être connue et indiquée sur la machine par le constructeur. La remarque faite antérieurement, relativement à la moindre action des couches extérieures de fil au point de vue de la production d'aimantation, s'applique également et à plus forte raison aux bobines en dérivation, dans lesquelles il y a souvent un grand nombre de couches.

Comme exemple, je citerai les données, déduites des épreuves de M. F. Sprague, pour une dynamo Edison-Hopkinson destinée à alimenter 200 lampes à 110 volts. $r_a = 0,0325$; $r_d = 37$; $R = 0,877$ (192 lampes); $Z = 5800$ (estimés); $n = 1157$; $\sigma = 0,00004789$; et $A G z = 0,00000253$. Les valeurs séparées de A , G et z ne peuvent se déduire des épreuves de M. Sprague.

Coefficient économique de la Dynamo en Dérivation.

Le coefficient économique η est le rapport de l'énergie électrique utile disponible dans le circuit extérieur à l'énergie électrique totale développée.

D'après la loi de Joule, il est développé en t secondes dans le circuit extérieur un

$$\text{travail utile} = i^2 R t,$$

et dans le même temps, il y a pour échauffement une

$$\text{énergie dépensée dans la dérivation} = i_a^2 r_a t,$$

et une...

$$\text{énergie dépensée dans l'armature} = i_a^2 r_a t;$$

d'où

$$\eta = \frac{\text{travail utile}}{\text{travail total}} = \frac{i^2 R}{i^2 R + i_a^2 r_d + i_a^2 r_a} \\ = \frac{1}{1 + \frac{R}{r_a} + \frac{2 i_a i_d r_a + i_a^2 r_a}{i^2 R}}$$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{1}{1 + \frac{R}{r_d} + \frac{r_a}{R} + 2 \frac{r_a r_d}{R} + \frac{r_a}{R} \left(\frac{r_d}{r} \right)^2} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{R}{r_d} + \frac{r_a}{R} + 2 \frac{R}{r_d} \cdot \frac{r_a}{R} + \frac{r_a}{R} \left(\frac{R}{r_d} \right)^2} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{R}{r_d} + \frac{r_a}{R} + 2 \frac{r_a}{r_d} + R \frac{r_a}{r_d^2}} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{R}{r_d} \left(1 + \frac{r_a}{r_d} \right) + \frac{r_a}{R} + 2 \frac{r_a}{r_d}} \end{aligned}$$

Maintenant, pour abrégé, représentons la résistance interne totale $r_a + r_d$ par le symbole unique r ; il vient —

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R}{r_d} \cdot \frac{r}{r_d} + \frac{r_a}{R} + 2 \frac{r_a}{r_d}}$$

Pour que ce rapport soit maximum, il faut évidemment qu'on ait

$$\frac{d \left(1 + \frac{R}{r_d} \cdot \frac{r}{r_d} + \frac{r_a}{R} + 2 \frac{r_a}{r_d} \right)}{dR} = 0$$

ou

$$\frac{r}{r_d^2} - \frac{r_a}{R^2} = 0;$$

d'où

$$R^2 = \frac{r_a r_d^2}{r} = r_a r_d \frac{r_d}{r},$$

et

$$R = \sqrt{r_a r_d} \sqrt{\frac{r_d}{r}}, \quad [\text{XIX.}]$$

ou

$$R = r_d \sqrt{\frac{r_a}{r}}. \quad [\text{XIXa.}]$$

Cette équation détermine la résistance particulière du circuit principal extérieur la plus économique, pour des résistances intérieures données. Substituons alors cette valeur dans les termes de

l'équation de η qui contiennent R, et nous obtiendrons pour leurs valeurs : —

$$\frac{Rr}{r_d^2} = \frac{r}{r_d} \sqrt{\frac{r_a}{r}} = \frac{\sqrt{r_a r}}{r_d},$$

$$\frac{r_a}{R} = \frac{r_a}{r_d} \sqrt{\frac{r}{r_a}} = \frac{\sqrt{r_a r}}{r_d};$$

d'où

$$\eta = \frac{\text{travail utile}}{\text{travail total}} = \frac{1}{1 + 2 \frac{\sqrt{r_a r}}{r_d} + 2 \frac{r_a}{r_d}}.$$

Cette expression peut d'ailleurs être encore simplifiée, car nous savons que la résistance de la dérivation est très élevée comparativement à celle de l'armature; elle peut être de 300 à 1000 fois aussi grande. Si donc $\frac{r_a}{r_d}$ est assez petit pour être négligeable vis-à-vis de l'autre terme, nous aurons

$$\eta = \frac{1}{1 + 2 \frac{\sqrt{r_a r}}{r_d}}; \quad [\text{XX.}]$$

et comme r_a est petit relativement à r_d , r est très approximativement égal à r_d , de sorte que nous pouvons écrire comme égalité approchée

$$\eta = \frac{1}{1 + 2 \frac{\sqrt{r_a r_d}}{r_d}},$$

ou

$$\eta = \frac{1}{1 + 2 \sqrt{\frac{r_a}{r_d}}}. \quad [\text{XXI.}]$$

Cette dernière valeur approximative est identique à celle donnée par Sir W. Thomson dans le Compte-rendu de l'Association Britannique de 1881 : l'équation N° [XX.] est cependant plus correcte.

Comme on peut le remarquer, il résulte de l'équation N° [XIX.] ci-dessus, que, si la résistance de l'induit est faible comparativement à celle de la dérivation, de telle sorte que r_d puisse être

pris comme égal à la valeur de r (ce qui serait très désirable si l'on pouvait y arriver dans la pratique), on aura

$$R = \sqrt{r_a r_d}; \quad [\text{XXII.}]$$

c'est-à-dire que, quand la proportion entre r_a et r_d est rendue aussi avantageuse que possible, la résistance extérieure de travail la plus économique est celle qui est moyenne géométrique entre les résistances de l'induit et des bobines en dérivation, tout écart de cette condition diminuant la valeur du coefficient économique.

Règles pratiques pour le Calcul d'une machine économique.

Nous trouvons là une indication pratique relativement à la répartition des résistances dans une dynamo en dérivation. Admettons que la question soit ainsi posée : Étant donnée la résistance r_a de l'induit, quelle doit être la résistance de la dérivation pour que la dynamo puisse (dans des conditions favorables de proportion de la résistance extérieure R) avoir un coefficient économique de 90 pour 100? — De l'équation [XXI.] nous tirons :

$$\frac{90}{100} = \frac{1}{1 + 2 \sqrt{\frac{r_a}{r_d}}},$$

$$\frac{100}{90} = 1 + 2 \sqrt{\frac{r_a}{r_d}},$$

$$10 = 180 \sqrt{\frac{r_a}{r_d}},$$

$$r_d = (18)^2 r_a,$$

$$r = 324 r_a.$$

Une machine en dérivation ne peut donner dans le circuit extérieur 90 pour 100 de son énergie électrique totale si son shunt n'a pas une résistance au moins 324 fois égale à celle de son armature.

On peut dans la pratique adopter la règle suivante qui donne

de bons résultats : — On commence par s'assurer du nombre de lampes que doit couramment alimenter la machine en plein fonctionnement et l'on vérifie la résistance quand elles sont insérées dans le circuit. Supposons que l'induit ait une résistance vingt fois moindre, et la dérivation une résistance vingt fois aussi considérable : dans ce cas, 4 pour 100 environ de l'énergie électrique seront consommés dans l'armature et 4 pour 100 environ dans la dérivation, laissant ainsi un peu plus de 90 pour 100 pour le coefficient économique.

Dans deux machines Edison (« K », 250 lumières; et « Z », 60 lumières) éprouvées à Munich, on a obtenu les chiffres suivants : —

	ARMATURE.	ÉLECTRO-AIMANT en DÉRIVATION.	$\frac{r_d}{r_a}$	η OBSERVÉ.
« K »	0,0361	43,82	382,8	88,6
« Z »	0,142	40,4	282,4	65,3

Une machine Edison-Hopkinson (200 lumières) éprouvée par M. F.-J. Sprague a donné : —

A froid..	0,026	36,5	1403	} 93,6
A chaud.	0,0325	37,0	1138	

*Détermination pratique de l'Enroulement des Bobines
d'Électro-aimants en dérivation.*

Supposons l'armature terminée et les carcasses d'électros prêtes à recevoir les fils. La question est celle-ci : — Comment devra être constituée la dérivation? Combien de tours de fil devra-t-elle contenir et quelle devra être la résistance du fil par mètre? — Une seule expérience préliminaire suffira après le mode d'opérer indiqué pour la dynamo en série à la page 230. Montez sur les noyaux des électro-aimants des bobines provisoires, formées à volonté d'un petit

nombre de spires de gros fil. Excitez séparément les électro-aimants par ces bobines provisoires à l'aide de quelques accumulateurs en faisant tourner l'armature à sa vitesse de régime. Augmentez le courant d'excitation jusqu'à ce que les électro-aimants arrivent au degré d'aimantation qui donne à la force électromotrice de la dynamo la valeur voulue. Relevez le nombre d'ampères qui a traversé les bobines provisoires et comptez le nombre de spires de ces bobines. Multipliez l'un par l'autre, et vous aurez le nombre d'ampères-tours nécessaire finalement aux bobines en dérivation pour amener les électro-aimants au degré voulu d'aimantation. Appelez ce nombre P. Reportez-vous alors à la formule N° [XXII.] du coefficient économique, pour voir quelle doit être la résistance de la dérivation. Vous connaissez naturellement r_a , puisque l'armature est déjà garnie de fil. Vous savez quelle sera la valeur de la résistance R de la charge normale en lampes; vous obtiendrez par suite la valeur convenable de r_d en appliquant la formule

$$r_d = \frac{R^2}{r_a}$$

Dans de bonnes conditions, r_d doit être au moins égal à 400 fois r_a , comme nous l'avons déjà dit. Connaissant maintenant r_d , et sachant également la valeur obtenue pour e , divisez e par r_d : vous en tirerez la valeur de i_d quand la dérivation travaille. Divisez alors par i_d le nombre d'ampères-tours P déterminé par l'expérience, et vous aurez ainsi finalement le nombre Z de tours cherché pour la dérivation. Mesurez la circonférence des noyaux et estimez la valeur moyenne de la longueur λ d'un tour de fil. Il y aura Z tours ayant chacun la longueur moyenne λ . La longueur totale de fil nécessaire sera $Z\lambda$, et sa résistance devra être r_d . On n'aura plus dès lors qu'à choisir un fil de diamètre tel que sa

$$\text{résistance par unité de longueur } \rho_d = \frac{r_d}{Z\lambda}$$

Tandis que nous examinons au point de vue pratique l'action magnétisante des bobines en dérivation, il est bon de remarquer que si nous augmentons Z, et par suite r_d dans la même proportion, c'est-à-dire si nous allongeons les bobines en ajoutant des tours de fil, le résultat sera une augmentation de la force électromotrice (la vitesse de rotation restant la même); en effet, en se reportant simplement aux équations N°s [XIV.], [XVI.] et [XVIII.], on verra que si Z et r_d augmentent proportionnellement l'un à l'autre, e , i et i_a augmentent tous de valeur. En se référant aux équations du coefficient économique, N°s [XX.], [XXI.] et [XXII.], on verra que, si r_d croît, non seulement η augmente, mais que la valeur de R, pour laquelle η est maximum, croît également. Il y a donc bénéfice à tous égards à augmenter la résistance de la dérivation, pourvu que le nombre d'ampères-tours n'en soit pas diminué.

Si, cependant, on cherchait à obtenir ce résultat en ajoutant de nouvelles couches de fil à l'extérieur des bobines en dérivation, on ne réussirait pas, parce que les spires extérieures ont plus de résistance par tour et ne possèdent pas la même puissance d'aimantation. Toutefois, en formant les spires extérieures de fil plus gros, de manière à rendre leur résistance relativement moindre à mesure que leur distance à la surface du noyau de fer augmente, on pourra faire profiter la machine de cette addition de spires supplémentaires.

CHAPITRE XV

THÉORIE ALGÈBRIQUE

Dynamos Auto-régulatrices.

La théorie de la machine auto-régulatrice est basée sur l'hypothèse, irréalisable d'une manière absolue dans la pratique, que les noyaux des électro-aimants renferment assez de fer et que ce fer est assez bon pour qu'il n'y ait pas saturation quand la machine fonctionne à son maximum. Elle présume également une disposition assez parfaite des organes d'entraînement pour que la machine tourne toujours exactement à la même vitesse, soit qu'elle effectue son plein travail, soit qu'elle ne travaille pas.

Les conditions ci-dessus étant remplies, il existe, comme nous le verrons, un grand nombre de manières différentes, plus ou moins compliquées, de combiner un système d'auto-régulation. Il y a toutefois deux problèmes distincts à résoudre par cette auto-régulation. Pour certaines applications — comme pour alimenter un système de lampes à incandescence montées parallèlement — le courant doit être fourni aux conducteurs principaux à un *potentiel* absolument *constant*, ou, comme on dit vulgairement, sous une *pression constante*; c'est-à-dire que la différence de potentiel entre les bornes de la dynamo doit être constante. Cette condition implique naturellement que le courant fourni par la machine varie exactement en raison inverse de la résistance dans le circuit extérieur. Pour d'autres applications — comme pour entretenir un groupe de lampes à arc reliées en simple série, ou pour charger un certain

nombre de groupes d'accumulateurs dans différentes habitations, ou pour actionner un certain nombre de moteurs (voire même une seule voiture (de tramway) en différents points sur une seule ligne — il est nécessaire de maintenir dans le circuit un *courant* absolument *constant*, quel que soit le nombre de lampes, d'accumulateurs, de moteurs en activité, ou la distance de la voiture sur la ligne. Ce qui revient à dire naturellement que, la résistance du circuit principal venant à augmenter par exemple, la dynamo doit par elle-même fournir une différence de potentiel proportionnellement plus élevée.

Les deux buts à atteindre par l'auto-régulation sont donc non seulement distincts, mais incompatibles l'un avec l'autre; il est impossible à une dynamo de conserver sa force électromotrice constante et en même temps de la modifier proportionnellement aux variations de la résistance dans le circuit extérieur. Les deux systèmes doivent en conséquence être envisagés tout à fait séparément. Ils s'appliquent à des cas de distribution électrique absolument différents. Leur théorie n'est pas la même.

Mais, ceci posé, il faut ajouter que, si les conditions d'une distribution sous *potentiel constant* sont distinctes de celles d'une distribution à *intensité constante*, les combinaisons permettant d'obtenir l'un ou l'autre de ces résultats sont, au point de vue de la machine génératrice, tout à fait analogues.

Le mode général de disposition du système d'une machine auto-régulatrice pour l'une ou l'autre de ces applications consiste dans l'addition, à la dynamo, d'une disposition spéciale destinée à maintenir soit une aimantation indépendante, soit une force électromotrice indépendante, soit un courant indépendant, dans la machine même ou dans son circuit, quels que puissent être sa propre aimantation d'auto-excitation, son courant ou sa propre force électromotrice. Une autre modification de la méthode permet même à une machine auto-excitatrice d'être très approximativement auto-régulatrice, une partie du circuit étant disposée de manière à être pratiquement indépendante dans sa réaction.

Pour arriver à une distribution sous *potentiel constant*, il faut réaliser l'une des combinaisons suivantes ;

- (I.) Dynamo en série + aimants permanents, pour exciter partiellement le champ magnétique au moyen d'une aimantation indépendante constante.
- (II.) Dynamo en série + un courant indépendant circulant dans des bobines distinctes autour des électro-aimants, pour produire une aimantation indépendante constante.
- (III.) Dynamo en série + un courant indépendant circulant dans le circuit principal (et engendré soit par une pile, soit par une machine magnéto indépendante), ayant pour effet d'exciter partiellement les électro-aimants avec une aimantation indépendante constante.
- (IV.) Dynamo en série + bobines d'électro-aimants en dérivation alimentées par une portion du courant de la machine elle-même, de manière à exciter partiellement les électro-aimants à l'aide d'une aimantation indépendante et approximativement constante.

Pour arriver à une distribution à *courant constant*, il faut adopter l'une des combinaisons analogues suivantes :

- (I.) Dynamo en dérivation + aimants permanents, pour exciter partiellement le champ magnétique au moyen d'une aimantation indépendante constante.
- (II.) Dynamo en dérivation + courant indépendant circulant dans des bobines distinctes d'électro-aimants, pour produire une aimantation indépendante constante.
- (III.) Dynamo en dérivation + courant indépendant circulant dans les bobines en dérivation en même temps que le courant dérivé (et provenant soit d'une pile, soit d'une machine magnéto indépendante), ayant pour effet d'exciter partiellement les électro-aimants à l'aide d'une aimantation indépendante constante.
- (IV.) Dynamo en dérivation + bobines d'électro-aimants en série alimentées par le courant du circuit principal de la machine elle-même, de manière à exciter partiellement les électro-aimants à l'aide d'une aimantation indépendante et constante.

Les deux méthodes marquées (IV.) dans chaque groupe sont souvent appelées modes de *compenser* la dynamo; l'expression de « dynamo *compound* ou compensée » ayant été adoptée pour une dynamo à enroulement mixte, en série et en dérivation, par analogie avec le nom de « machine *compound* » donné par les ingénieurs à une machine à vapeur fonctionnant avec deux cylindres à haute et à basse pression. Les règles de montage des machines applicables aux deux cas seront exposées en leur lieu et place.

Théoriquement, on peut employer diverses autres combinaisons d'auto-régulation : — par exemple, une machine en série à électro-aimants non saturés combinée avec une machine en série (quasi-indépendante) à électro-aimants sursaturés montée sur le même arbre; — une machine en série munie de deux groupes de pôles d'électro-aimants différemment placés, l'un de ces deux groupes de pôles étant le groupe excité en série, l'autre le groupe excité indépendamment, ou en circuit dérivé, etc.

Dans l'étude des deux modes de distribution, nous aurons à trouver les expressions de deux éléments : (a) le courant ou le potentiel indépendant qui détermine l'aimantation indépendante, et (b) la « vitesse critique », c'est-à-dire la vitesse particulière de rotation à laquelle s'effectue l'auto-régulation. La relation entre cette vitesse critique et la caractéristique de la dynamo est examinée dans le chapitre qui traite de la Théorie géométrique des machines, page 303.

Distribution sous Potentiel constant.

Cas (I.). — Dynamo en série + Aimants permanents. — Si les électro-aimants sont partiellement excités d'une façon permanente, ou si des aimants permanents en acier sont ajoutés aux électro-aimants, constituant ainsi un champ partiel permanent, indépendant de celui dû au courant dans le circuit, nous pouvons désigner par H_1 ce champ indépendant.

Or l'équation fondamentale de la dynamo en série est

$$E = 4n A H,$$

et la différence de potentiel entre les bornes, autrement appelée la pression, est, ainsi que nous l'avons montré page 225,

$$e = E - (r_a + r_m) i.$$

Mais le champ magnétique H est formé de deux parties, l'une permanente et indépendante H_1 , l'autre dépendante du courant i , et égale à $G \times Y i$, expression dans laquelle Y est le nombre de tours de fil sur les électro-aimants, α le coefficient de perméabilité magnétique, et G le coefficient géométrique, exactement comme pour la dynamo ordinaire en série, à l'exception du terme de saturation que nous omettons. Nous pouvons alors écrire pour H ,

$$H = H_1 + G \times Y i,$$

et nous obtenons pour l'expression complète de e ,

$$e = 4n A (H_1 + G \times Y i) - (r_a + r_m) i,$$

ou

$$e = 4n A H_1 + 4n A G \times Y i - (r_a + r_m) i.$$

Le second membre de cette équation se compose de trois termes, dont le premier contient comme facteurs la vitesse et trois constantes. Les deux derniers renferment une variable, le courant, et la vitesse entre également comme facteur dans l'un d'eux. S'il existe une vitesse particulière à laquelle la dynamo est réellement auto-régulatrice, évidemment, à cette vitesse, l'expression de e ne renfermera que des constantes. Il est clair, par conséquent, que, à la *vitesse critique*, que nous appellerons n_c , les deux derniers termes s'annuleront mutuellement, ou

$$4n_c A G \times Y i - (r_a + r_m) i = 0.$$

C'est-à-dire que la vitesse doit être telle que

$$4n_c A G \times Y = r_a + r_m. \quad [\text{XXIII.}]$$

Telle est l'équation de condition.

Si la condition posée par cette équation est réalisée, les deux derniers termes de l'expression de e disparaissent, et nous avons simplement

$$e = 4n_c A H_1 = \text{constante.}$$

Étant ainsi prouvé que, à la vitesse critique, e est constant, il est utile de rechercher ce qui détermine la valeur de e . On voit clairement que e est directement proportionnel au magnétisme H_1 permanent et indépendant du champ. Nous pouvons, en conséquence, nous arranger pour que la dynamo, toujours à la vitesse critique, fournisse tel potentiel que nous voudrions, pourvu que nous fassions varier H_1 dans la proportion voulue.

Revenant à l'équation de condition, nous l'écrivons sous la seconde forme

$$4n_1 A G z Y = r_a + r_m,$$

qui nous donne, pour valeur de la vitesse critique,

$$n_1 = \frac{r_a + r_m}{Y} \cdot \frac{1}{4 A G z}.$$

On voit par là qu'il y a une autre manière d'obtenir pour e une plus haute valeur. Si nous augmentons n_1 , nous savons que e croîtra aussi proportionnellement, et nous pouvons augmenter n_1 à la condition de diminuer en même temps Y dans le rapport inverse. S'il en est ainsi, la condition critique subsiste toujours, $4 n_1 A G z Y$ restant encore égal à $r_a + r_m$.

Finalement, nous pouvons écrire la dernière équation de la manière suivante,

$$\text{vitesse critique} = \frac{\text{résistance intérieure totale}}{\text{nombre de spires des bobines d'inducteurs}} \times \text{une constante.}$$

Cette forme est également instructive. Plus la résistance intérieure de la machine est élevée, plus sa vitesse de rotation doit être grande si elle doit être auto-régulatrice.

Cas (II.). — Dynamo en série + Bobines d'excitation séparée (voir *Machine en série et à excitation séparée*, fig. 68, p. 94). — Il y a dans ce cas un magnétisme indépendant dû à un courant circulant dans les inducteurs sur des bobines séparées et fournissant une portion de l'aimantation du champ. La figure 159 indique les connexions. Appelons H_1 l'intensité du champ due aux bobines excitées séparément.

Nous avons alors, comme précédemment,

$$e = E - (r_a + r_m) i,$$

$$E = 4n A H,$$

et

$$H = H_1 + G \times Y i,$$

d'où, comme dans le cas précédent,

$$e = 4 n A H_1 + 4 n A G \times Y i - (r_a + r_m) i,$$

et la condition pour que e devienne constant est, comme précédem-

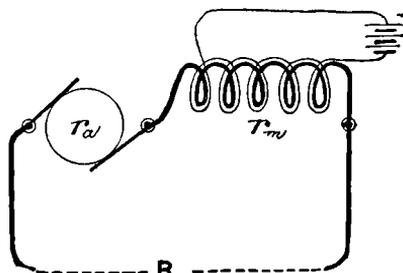


FIG. 159.

ment, qu'on donne à la vitesse une valeur n_1 telle que

$$4n_1 A G \times Y = r_a + r_m. \quad [\text{XXIV.}]$$

Les conclusions précédentes subsistent. Nous pouvons donner à e telle valeur qu'il nous plaît en faisant varier dans la proportion voulue la valeur de l'excitation H_1 due à la source de courant indépendante. Et, comme précédemment, la vitesse critique sera proportionnelle à la résistance intérieure totale.

Détermination pratique de l'Enroulement des Bobines en circuit principal et des Bobines d'Excitation séparée.

Il peut être utile d'indiquer la manière de déterminer les enroulements dans un cas spécial, notamment quand les bobines d'excitation séparée sont alimentées par une machine magnéto montée sur le même arbre. Nous distinguerons par la lettre B la machine magnéto auxiliaire. Des bobines pro-

visoires, d'un nombre de spires connu, doivent être montées sur les noyaux des électro-aimants, et quelques accumulateurs employés à exciter ces bobines pendant les expériences. Faites d'abord tourner la machine B à une vitesse convenable, et prenez sa force électromotrice que nous appellerons e_b volts. Faites ensuite tourner la dynamo à sa vitesse de régime, mais à circuit ouvert, et en excitant séparément ses électro-aimants à l'aide des accumulateurs, jusqu'à ce que la différence de potentiel aux bornes arrive à la valeur voulue de e volts. Relevez le nombre d'ampères qui circule dans les bobines provisoires, multipliez-le par le nombre de spires, et appelez P le nombre d'ampères-tours ainsi obtenu. C'est le nombre d'ampères-tours que doit fournir la machine B dans les bobines séparées. Économiquement parlant, ces bobines doivent avoir une résistance r_a au moins vingt fois égale à celle de l'armature de la machine B. Nous savons donc ce que doit être r_a . Divisez e_b par $r_a +$ la résistance de l'armature de B. Vous obtiendrez ainsi le courant i_a dans les bobines séparées. Divisez P par i_a et le quotient sera le nombre de spires des bobines séparées ; appelons-le Z. Dès lors, si λ est la longueur moyenne d'une spire des bobines, $Z\lambda$ sera la longueur de fil cherchée pour les bobines indépendantes, et son diamètre devra être tel que l'on ait pour sa résistance ρ_a par unité de longueur.

$$\rho_a = \frac{r_a}{Z\lambda}.$$

Formez alors le circuit de la dynamo d'une résistance R à peu près égale à celle de la charge complète qu'elle aura dans la pratique, et excitez-la de nouveau séparément avec les accumulateurs jusqu'à ce que le potentiel aux bornes du circuit principal s'élève à e . Appelez Q le nombre d'ampères-tours dans cette expérience. Dès lors les bobines dans le circuit principal doivent être telles qu'elles donnent Q — P ampères-tours d'excitation. Si le courant circulant dans la dernière expérience était i , $\frac{Q - P}{i} = Y$ sera le nombre cherché de spires. Maintenant, par raison d'économie, la résistance r_m des bobines en circuit principal sur les électro-aimants doit être environ $\frac{2}{3}r_a$. Par suite, en désignant par ρ_m la résistance par unité de longueur du fil de ces bobines, on voit qu'elles doivent être constituées de fil tel que sa résistance par unité de longueur

$$\rho_m = \frac{2r_a}{3Y\lambda},$$

ce qui détermine le diamètre du fil à employer.

Cas (III.). — Dynamo en série + Force électromotrice indépendante agissant dans le circuit principal. — Ce cas en comprend réellement deux : celui où la force électromotrice indépendante constante est due à une pile, et celui où elle est due à une machine magnéto séparée tournant à vitesse constante (*Dynamo en série et*

machine magnéto, fig. 69, p. 95). La discussion est toutefois la même dans les deux cas. La figure 160 représente l'un d'eux.

Nous avons ici comme force électromotrice totale du système la force électromotrice E de l'armature, plus la force électromotrice indépendante E_b provenant de la pile ou de la machine magnéto. La différence de potentiel entre les bornes, que nous avons toujours désignée par e , s'obtiendra en retranchant de $E_b + E$ la portion de la force électromotrice employée à lancer le courant i dans

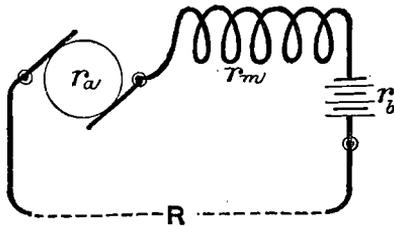


FIG. 160.

les résistances intérieures qui sont maintenant r_a , r_m et r_b ; de sorte que nous avons

$$e = E_b + E - (r_a + r_m + r_b) i;$$

or $E = 4 n A G \times Y i$; par suite, pour que les deux derniers termes du second membre s'annulent mutuellement et laissent e constant, il faut donner à la dynamo une vitesse n_1 telle que

$$4 n_1 \times \overline{A G Y} = r_a + r_m + r_b, \quad [\text{XXV.}]$$

qui est l'équation de condition. Dans ce cas,

$$e = E_b.$$

On voit ainsi que, dans ce cas également, le potentiel constant aux bornes est égal à celui qui est dû à l'excitation indépendante. Naturellement cela ne veut pas dire que la dynamo n'effectue aucun travail. Il faut y voir au contraire que, quand la résistance du circuit extérieur est infinie, de telle sorte que la dynamo n'effectue aucun travail, la seule force électromotrice agissant dans le circuit est celle qui est due à la source indépendante. On démontrerait aisément que, dans le cas où la résistance extérieure R est égale à la

résistance intérieure totale ($r_a + r_m + r_b$), $E = E_b$, et le travail fourni par la dynamo est exactement égal à celui que fournit la pile ou la machine magnéto. Si cependant, comme l'exige la question d'économie, la résistance du circuit extérieur est plus grande que la résistance intérieure, alors la pile ou la machine magnéto effectue la plus grande partie du travail. La dynamo en série qui fait partie du système est le régulateur véritable et fournit constamment à la pile ou à la machine magnéto le complément d'énergie électrique suffisant pour entretenir le courant à la force électromotrice voulue à travers les résistances du circuit extérieur quelles qu'elles puissent être.

Comme dans le Cas (I.) nous pouvons mettre l'équation de condition sous une forme indiquant les conditions déterminantes de la vitesse. Nous avons ainsi

$$n_1 = \frac{r_a + r_m + r_b}{Y} \cdot \frac{1}{4 A G z},$$

ou

$$\text{vitesse critique} = \frac{\text{résistance intérieure totale}}{\text{nombre de spires des bobines inductrices}} \times \text{une constante.}$$

La constante $4 A G z$ dépend uniquement de la construction de la dynamo et de la qualité des matériaux qui la constituent. Comme la résistance intérieure totale est une quantité donnée, il est clair qu'on peut modifier la vitesse, à la condition de modifier dans la proportion inverse le nombre des spires des bobines inductrices.

Détermination pratique de l'Enroulement des Bobines d'électro-aimants.

Supposons que nous ayons à disposer une combinaison de ce genre destinée à alimenter par exemple un certain nombre de lampes à incandescence, à un potentiel déterminé de e volts; nous devons avoir recours à un procédé analogue à celui précédemment décrit, c'est-à-dire à l'excitation séparée de bobines indépendantes sur les noyaux des électro-aimants. Nous prendrons le cas où la source indépendante est une machine magnéto. Nous savons que, lorsqu'elle tourne à sa vitesse de régime, sa force électromotrice est E_b . Reliez les bornes de la dynamo par une résistance R représentant la charge maxima de la machine en lampes; faites tourner la dynamo à sa vitesse de régime et excitez-la séparément jusqu'à ce que e arrive au nombre voulu de volts. Appelons P le nombre d'ampères-tours correspondant. Divisez P par i (le courant réel de

l'expérience); vous aurez ainsi le nombre Y des spires qui doivent être mises sur les noyaux d'une façon définitive. Nous rappelant alors que, dans une dynamo en série, r_m doit être environ les deux tiers de r_a , et appelant λ la longueur moyenne d'une spire des bobines d'électro-aimants, nous aurons pour la résistance par unité de longueur du fil des bobines

$$\rho_m = \frac{2 r_a}{3 Y \lambda},$$

qui détermine le diamètre du fil à choisir.

Cas (IV.).—Dynamo en série + Bobines excitatrices en dérivation :
Dynamo « compound ». — La dynamo en série, quand, en plus des bobines en circuit principal ou en série, elle est pourvue d'un certain nombre de bobines en dérivation, devient très approximativement auto-régulatrice; et, comme dans les cas précédents, il existe une certaine vitesse critique pour laquelle la régulation approche le plus de la perfection. Il y a deux manières possibles de connecter les bobines en dérivation sur la dynamo, et les relations diffèrent légèrement dans les deux cas. Les bobines en dérivation peuvent être placées en dérivation uniquement sur la portion de la dynamo constituée par l'induit, c'est-à-dire *de balai à balai*. Ce cas est spécifié dans la première partie de cet ouvrage, sous le nom de « Dynamo en série et en dérivation » (voir fig. 70, p. 97). Dans le second système, les bobines en question sont placées en dérivation *sur les bornes* de la machine, et peuvent, en conséquence, être regardées comme une dérivation sur le circuit extérieur, ou comme une dérivation à la fois sur l'induit et sur les bobines en série. J'ai donné à cette dernière disposition le nom de « Dynamo en série et en longue dérivation » (voir fig. 71, p. 98). Dans la première disposition, le courant dans la dérivation n'est pas constant, attendu que le potentiel ϵ aux balais n'est pas le même que celui aux bornes e ; et, bien que e puisse rester parfaitement constant, il n'en est pas de même de ϵ qui augmente quand la résistance du circuit extérieur diminue. Dans la dernière disposition « longue dérivation », le courant à travers la dérivation est constant si e est constant, et ce cas est analogue à ceux, précédemment étudiés, d'une excitation constante indépendante.

Dynamo en Série et en Dérivation.

Les connexions de ce système sont indiquées dans la fig. 161.

En employant les mêmes symboles que précédemment, et désignant par Y le nombre de spires des bobines dans le circuit principal ou en série, et par Z le nombre de spires des bobines en dérivation, nous avons

$$\begin{aligned} E &= 4n A \Pi; \\ H &= G z (Z i_a + Y i); \\ i &= i_a - i_d; \\ e &= E - r_a i_a - r_m i; \end{aligned}$$

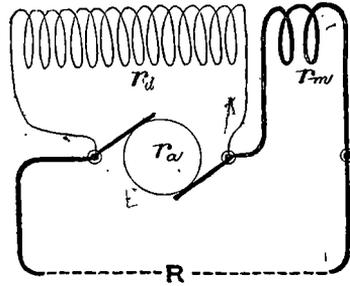


FIG. 161.

d'où nous tirons

$$\begin{aligned} e &= 4n A G z Z i_d + 4n A G z Y (i_a - i_d) - r_a i_a - r_m i_a + r_m i_d, \\ e &= 4n A G z (Z - Y) i_a + r_m i_d + 4n A G z Y i_a - (r_a + r_m) i_a. \end{aligned}$$

Les deux derniers termes du second membre s'annuleront mutuellement si l'on donne à la vitesse une valeur n_1 telle que

$$4 n_1 A G z Y = r_a + r_m, \quad [XXVI.]$$

qui est, par suite, une des deux équations de condition. Elle peut également s'écrire —

$$4 n_1 A G z = \frac{r_a + r_m}{Y}.$$

Nous avons alors, à la vitesse critique n_1 ,

$$e = \left\{ 4 n_1 A G z (Z - Y) + r_m \right\} i_d.$$

Maintenant si la dynamo est réellement auto-régulatrice, elle donnera un potentiel constant e même à circuit extérieur ouvert. Dans ce cas, le seul courant produit sera celui engendré dans l'armature et parcourant la dérivation. Dans les équations de ce système, Y ni r_m ne peuvent entrer, puisque les bobines en série ne sont le siège d'aucun courant, et le potentiel e sera le même que le potentiel aux balais. En réalité, dans ces conditions, cette disposition

peut être considérée soit comme une dynamo en série dans laquelle on a substitué la résistance r_d aux résistances R et r_m , ou comme une dynamo en dérivation dans laquelle R est devenu infini. Nous pouvons, en conséquence, nous reporter immédiatement soit à l'équation [IX.] de la dynamo en série, soit à l'équation [XIV.] de la dynamo en dérivation, et, faisant alors les substitutions ci-dessus, nous pouvons écrire

$$e = \frac{1}{\sigma} \left\{ 4 n_1 A G z \frac{r_d}{r_d + r_a} - \frac{r_d}{Z} \right\}.$$

Mais nous avons déjà trouvé une valeur pour $4 n_1 A G z$; et en remplaçant ce facteur par sa valeur dans l'équation précédente, il nous vient

$$e = \frac{1}{\sigma} \left\{ \frac{r_d (r_a + r_m)}{Y (r_d + r_a)} - \frac{r_d}{Z} \right\} = \text{constante.}$$

Or cette équation doit être vraie même si la dynamo renferme assez de fer pour que ce fer soit toujours éloigné du point de saturation; c'est-à-dire même si σ est excessivement petit. Mais si σ est excessivement petit, $\frac{1}{\sigma}$ sera excessivement grand; et si $\frac{1}{\sigma}$ est excessivement grand, il est clair que le terme entre accolades doit être lui aussi excessivement petit. En réalité, si les électro-aimants sont éloignés du point de saturation, il est pratiquement nul. Nous pouvons donc écrire

$$\frac{r_d (r_a + r_m)}{Y (r_d + r_a)} = \frac{r_d}{Z},$$

ou

$$\frac{Y}{Z} = \frac{r_a + r_m}{r_d + r_a}, \quad [\text{XXVII.}]$$

qui est la *seconde* équation de condition.

Transcrite en langage ordinaire, elle exprime que : — *Le nombre des spires en série doit être au nombre des spires en dérivation comme la somme des résistances de l'induit et des bobines en série est à la somme des résistances de l'induit et des bobines en dérivation.*

Détermination pratique de l'Enroulement des Bobines inductrices.

Comme dans les cas précédents, nous pouvons maintenant fournir un mode de détermination expérimentale de l'enroulement approprié au cas qui nous occupe. Des bobines provisoires d'un nombre connu de spires doivent être montées sur les noyaux d'électros et il faut quelques accumulateurs comme dans les cas précédents. On fait tourner la dynamo à sa vitesse de régime, et on excite alors les inducteurs jusqu'à ce que le potentiel e atteigne le nombre voulu de volts. On opère d'abord ainsi en circuit ouvert pour déterminer Z et on calcule ensuite Y au moyen de l'équation [XXVII.]; on peut encore déterminer Y par une seconde expérience faite avec une résistance en circuit, R , équivalente à la charge totale de lampes à alimenter. On relève les ampères traversant dans les deux cas les bobines provisoires et on les multiplie par le nombre de spires des bobines. Appelons P le nombre d'ampères-tours nécessaire à l'excitation des électros en circuit ouvert, et désignons par Q le nombre d'ampères-tours correspondant au fonctionnement sur la résistance R ; la règle se déduit alors de la manière suivante : — Nous savons que $P = Zi_a$ et que $i_a = \frac{e}{r_a}$. Or la production économique du champ magnétique dans une dynamo en dérivation ordinaire exige que r_a soit au moins égal à 400 fois r_a , et, dans une machine ayant aussi des bobines en série, r_a doit être beaucoup plus grand, soit 1 000 à 1 500 fois r_a . Connaissant r_a , nous connaissons r_a ; nous pouvons donc aussi calculer quel doit être i_a . Finalement Z est déterminé par la relation

$$Z = \frac{P r_a}{e}. \quad [\text{XXVIII.}]$$

La valeur de Y peut être ensuite calculée d'après l'équation [XXVII.]

Il est préférable de déterminer Y par expérience, bien que ce mode de procéder soit un peu plus compliqué, le courant dans la dérivation n'étant pas constant, mais augmentant en même temps que le courant dans les bobines en série. Mais nous savons que

$$Q = Z i'_a + Y i,$$

i'_a représentant le courant dans la dérivation au moment où le courant dans le circuit extérieur a pour valeur i . Or i'_a est la même chose que $\frac{\varepsilon}{r_a}$, ε étant la différence de potentiel entre les balais, et comme

$$\frac{\varepsilon}{e} = \frac{R + r_m}{R},$$

il s'ensuit que

$$\begin{aligned} Q &= Z \frac{e}{r_a} + Z \frac{e r_m}{R r_a} + Y i, \\ &= P \left(1 + \frac{r_m}{R} \right) + Y i. \end{aligned}$$

Mais comme r_m n'est que les deux tiers de r_a , et que r_a est petit relativement à R , nous pouvons négliger le terme $\frac{r_m}{R}$, ce qui réduit l'expression à

$$Q - P = Y i;$$

d'où

$$Y = \frac{Q - P}{i} = \frac{(Q - P) R}{e}. \quad [\text{XXIX.}]$$

On voit par là que toute excitation additionnelle nécessaire au maintien d'un courant extérieur i doit provenir des bobines en circuit principal. Dans la seconde expérience on a relevé le nombre d'ampères i , ce qui permet de calculer immédiatement Y .

Il ne reste plus qu'à déduire de là le diamètre du fil à employer. Il doit y avoir Y spires, et la résistance totale de r_m doit être les deux tiers de celle de r_a . Si donc λ est la longueur d'un tour de fil, il faut choisir pour ce fil un diamètre tel que sa résistance par unité de longueur soit

$$r_m = \frac{2 r_a}{3 Y \lambda}.$$

Le fil de dérivation peut se calculer de la même manière. Il doit y avoir Z spires de résistance totale r_d . Si ces spires doivent être (comme on le fait ordinairement) enroulées à l'extérieur des bobines en série, la longueur moyenne d'une spire sera supérieure à λ , — appelons-la λ' . Le fil devra être alors d'un diamètre tel que sa résistance par unité de longueur soit

$$r_d = \frac{r_a}{Z \lambda'}.$$

La Corporation Anglo-américaine (Brush) a depuis quelques mois employé pour la détermination de l'enroulement un procédé pratique de l'invention de M. C. Watson. Je n'en connais pas les détails; mais, comme il comporte une expérience préliminaire avec des bobines excitées séparément, il ressemble, sans aucun doute, plus ou moins à celui que nous avons décrit.

Dynamo en Série et en Longue dérivation.

Les connexions de ce système sont représentées dans la fig. 162.

Les symboles sont les mêmes que dans le cas précédent, mais les calculs diffèrent légèrement. Nous avons en effet ici :

$$E = 4n A H;$$

$$H = G z (Z i_d + Y i_a);$$

$$e = E - (r_a + r_m) i_a;$$

d'où

$$e = 4n A G z Z i_d + 4n A G z Y i_a - (r_a + r_m) i_a.$$

Le premier terme du second membre est constant si le courant qui circule dans la dérivation est constant, comme il doit l'être *par hypothèse*, et, par suite, e sera constant à la condition que la vitesse soit telle que

$$4n_1 A G z Y = r_a + r_m; \quad [\text{XXX.}]$$

qui est, comme précédemment, la première équation de condition. Mais elle laisse e indéterminé. Pour déterminer e , supposons qu'on fasse une expérience en circuit extérieur ouvert. Alors le courant i_d circulera

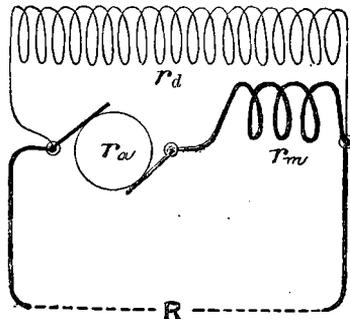


FIG. 162.

dans la dérivation, et le même courant traversera aussi les bobines en série, de sorte que l'excitation réelle des inducteurs sera $(Z + Y) i$ ampères-tours, au lieu d'être simplement $Z i_d$, et la dynamo dans ces conditions fonctionnera comme une simple dynamo en série avec r_a , r_m et r_d comme résistances en circuit.

D'après l'équation [IX.] page. 227, il résulte de là que

$$e = \frac{1}{\sigma} \left\{ \frac{4n_1 A G z}{1 + \frac{r_a + r_m}{r_d}} - \frac{r_d}{Z + Y} \right\}.$$

Le terme $\frac{r_a + r_m}{r_d}$ étant petit peut être négligé; et, en remplaçant $4n_1 A G z$ par sa valeur, on obtient

$$e = \frac{1}{\sigma} \left\{ \frac{r_a + r_m}{Y} - \frac{r_d}{Z + Y} \right\}.$$

Ici comme précédemment, la faible valeur de σ nous permet d'écrire

$$\frac{r_a + r_m}{Y} - \frac{r_d}{Z + Y} = 0,$$

qui est la seconde équation de condition. On en tire immédiatement

$$\frac{Z}{Y} = \frac{r_d - r_a - r_m}{r_a + r_m}, \quad [\text{XXXI.}]$$

qui donne la proportion des nombres de spires.

Détermination pratique de l'Enroulement des Bobines inductrices.

Le procédé est identique à celui précédemment décrit, mais les calculs ne sont pas tout à fait les mêmes. Soit P le nombre d'ampères-tours nécessaire à l'excitation des inducteurs au degré voulu en circuit ouvert, et Q le nombre d'ampères-tours correspondant quand la machine travaille sur une résistance R .

On a

$$\begin{aligned} P &= (Z + Y) i_d, \\ &= Z i_a + Y i_a; \\ Q &= Z i_a + Y i_a, \\ &= Z i_a + Y (i_a + i), \\ &= Z i_a + Y i_a + Y i; \end{aligned}$$

d'où

$$Q - P = Y i,$$

et par suite

$$Y = \frac{Q - P}{i} = \frac{(Q - P) R}{e}, \text{ comme précédemment.} \quad [\text{XXXII.}]$$

La valeur de Z peut être déterminée d'après l'équation [XXXI.] ou être déduite de l'expérience qui donne :

$$Z = \frac{P r_d}{e} - \frac{(Q - P) R}{e},$$

ou

$$Z = \frac{P}{i_d} - Y. \quad [\text{XXXIII.}]$$

Y et Z étant ainsi déterminés, le diamètre du fil se calcule exactement comme dans le cas précédent.

**Effet pratique du Terme de Saturation
dans les Machines Compound.**

On aura remarqué que dans chacun des cas précédents, après avoir obtenu la première équation de condition, nous avons étudié le fonctionnement de la machine en circuit ouvert et déterminé la valeur fondamentale de e en recourant à l'équation N° [IX.] de la dynamo en série, déduite elle-même d'équations comprenant un terme de saturation. En fait, s'il n'y avait pas de terme de saturation, la force électromotrice, au lieu d'être constante, serait indéterminée. Mais l'intervention du terme de saturation se manifeste encore d'une autre façon. Si la dynamo était enroulée d'après les données de l'équation N° [XXVII.], après une seule expérience faite en circuit ouvert, alors que les inducteurs sont relativement peu excités, on trouverait qu'en plein travail il n'y aurait pas tout à fait

assez de spires en série (à moins qu'elles ne soient enroulées à l'intérieur des bobines en dérivation de manière à les avantager un peu) pour maintenir e à sa valeur, par suite de la saturation partielle du fer. Si, d'un autre côté, la valeur de Y a été déterminée par une expérience faite sur la génératrice alors qu'elle produit son courant moyen maximum, on trouvera que, si e est identique avec le courant maximum aussi bien que sans courant, il y a néanmoins un léger *accroissement* de e quand le courant est inférieur au maximum. On en comprendra le motif en se reportant à la figure 192, page 319. La caractéristique PQ n'est jamais exactement une ligne droite; elle est toujours légèrement convexe à la partie supérieure. En conséquence, bien que le potentiel QJ entre les bornes du circuit extérieur quand le courant est maximum puisse être exactement égal au potentiel OP en circuit ouvert, le potentiel en un point intermédiaire, αE par exemple, sera légèrement plus élevé. Ce phénomène s'observe effectivement dans les meilleures dynamos compound. On en trouvera la preuve en considérant les caractéristiques données dans la figure 194, page 321.

Effet de la Réaction de l'Induit.

Le courant circulant dans l'induit réagit, comme nous le savons, sur les inducteurs; il tend à leur donner une aimantation partielle de polarité inverse de celle de l'induit lui-même et proportionnelle au courant dans l'induit. Par le fait, dans quelques machines montées en dérivation, la réaction de l'induit produit un effet analogue à celui d'une bobine en série et rapproche la machine de l'auto-régulation. Cet effet a été observé dans une dynamo Edison-Hopkinson, mais il était également dû en partie à la faible résistance de l'induit relativement à celle du circuit extérieur.

Distribution sous Courant constant ou à Intensité constante.

Ce système de distribution a des applications plus limitées, aussi consacrerons-nous moins de place à l'établissement des équations qui s'y rapportent. Il nous faut trouver ici des expressions du courant i dans le circuit extérieur, et, après les avoir

trouvées, en tirer les équations de condition auxquelles il doit être satisfait pour que ces valeurs soient constantes.

Cas (I.). — Dynamo en dérivation + Aimants permanents. —
Les expressions fondamentales sont

$$\begin{aligned} E &= 4n A H \\ H &= H_1 + G z Z i_d, \end{aligned}$$

H_1 représentant le champ dû à la partie permanente de l'aimantation, d'où

$$E = 4n A H_1 + 4n A G z Z i_d.$$

Or nous savons que E est égal à la somme des forces électromotrices respectivement développées, partie dans l'induit, partie dans la dérivation du circuit, ou que

$$E = r_a i_a + r_d i_d;$$

car elles forment un circuit fermé sur elles-mêmes. Mais

$$i_a = i_d + i$$

d'où

$$E = r_a i_d + r_a i_d + r_o i.$$

Par suite

$$4n A G z Z i_d - (r_d + r_a) i_d + 4n A H_1 = r_a i.$$

Maintenant, si nous faisons tourner la dynamo à une vitesse n_1 , telle que les termes contenant i_d s'annulent, nous devons écrire

$$4n_1 A G z Z = r_d + r_a$$

comme équation de condition. Cette condition étant remplie, il reste

$$4n_1 A H_1 = r_a i$$

ou

$$i = \frac{4n_1 A H_1}{r_a}, \quad [\text{XXXIV.}]$$

expression constante quelle que puisse être la valeur de R .

Il est clair également que

$$n_1 = \frac{r_d + r_a}{Z} \cdot \frac{1}{4 A G z}, \quad [\text{XXXV.}]$$

ce qui revient à dire que la vitesse critique est proportionnelle à la résistance de la dynamo fonctionnant sur la dérivation seule, le circuit principal étant ouvert. Nous pouvons en réalité écrire

$$\text{vitesse critique} = \frac{\text{résistance intérieure totale}}{\text{nombre de spires dans les bobines en dérivation}} \times \text{une constante.}$$

On remarquera également que la constante est égale au courant qui serait engendré par l'induit tournant à la vitesse critique dans le champ sans autre résistance que celle de r_m et sans excitation du champ magnétique autre que son magnétisme permanent. *La méthode pratique de détermination de l'enroulement spécial à ce cas est basée sur ce fait.*

Détermination pratique de l'Enroulement des bobines inductrices.

Commencez par mettre l'armature en court circuit à travers un ampèremètre sans résistance appréciable et faites varier la vitesse de la machine jusqu'à ce qu'elle donne le courant voulu. Vous obtiendrez ainsi la vitesse critique. Faites-la tourner ensuite à la même allure avec les bornes reliées par la résistance extérieure maxima R correspondant au régime normal de la machine et avec une dérivation provisoire de résistance r_a . La valeur de r_a est une question d'économie. Si la machine doit être réellement économique (voir p. 244), R doit être au moins vingt fois aussi grand que r_a , et r_a au moins 400 fois égal à r_a . Il faut alors exciter séparément la machine à l'aide de bobines provisoires, jusqu'à ce que, à la vitesse critique, elle donne un courant égal à i , ce qui permettra de calculer immédiatement i_a . Soit Q le nombre d'ampères-tours nécessaire à l'excitation des bobines provisoires, $Q + i_a = Z$, le nombre cherché de spires ; le diamètre du fil devra être tel que $Z \lambda = r_a$, λ étant la longueur moyenne d'une spire.

Cas (II.). — Dynamo en dérivation + Bobines d'excitation séparée (voir *Dynamo à excitation dérivée et à excitation séparée*, fig. 72, p. 99). — Dans ce cas, l'excitation indépendante est due à un courant i'_a parcourant des bobines séparées de Z' spires (voir fig. 163). Ici, par conséquent

$$H = G z (Z i_a + Z' i'_a).$$

Nous pouvons remplacer $G k Z' i'_a$ par le symbole spécial H_1 , car il est indifférent pour le fonctionnement de la machine que le

champ indépendant soit dû à un courant séparé ou à des aimants permanents.

Les conditions sont, par conséquent, exactement les mêmes que dans le Cas (I.) précédent; la vitesse critique étant

$$n_c = \frac{r_d + r_a}{Z} \cdot \frac{1}{4 A G \alpha},$$

et le courant critique

$$i_c = \frac{4 n_c A H_1}{r_a} = \frac{4 n_c A G \alpha Z' i'_a}{r_a}.$$

Mais nous pouvons écrire

$$4 n_c A H_1 = E',$$

force électromotrice due à $Z' i'_a$ dans les électro-aimants; auquel cas

$$i_c = \frac{E'}{r_a}, \quad [\text{XXXVI.}]$$

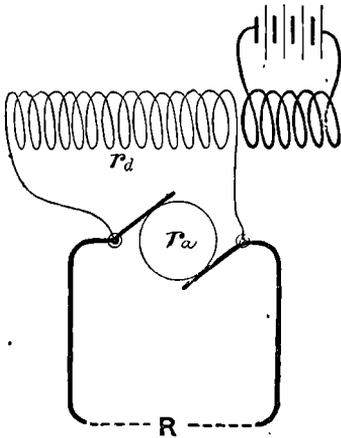


FIG. 163.

ce qui montre que le courant critique est égal au courant que déterminerait dans l'induit la force électromotrice uniquement due à la portion du champ excitée séparément.

L'expérience pratique pour la détermination de l'enroulement des bobines est identique à la méthode employée dans le cas précédent; mais ici on peut modifier à volonté l'intensité du courant à la vitesse critique en faisant varier Z' ou i' .

Cas (III.). — Dynamo en dérivation + Force électromotrice indépendante agissant dans le circuit. —

Ce cas en comprend réellement deux : (a) l'un dans lequel la force électromotrice d'une pile ou d'une machine magnéto intervient dans la partie-armature; (b) l'autre dans lequel cette force électromotrice intervient dans la partie-dérivation du système.

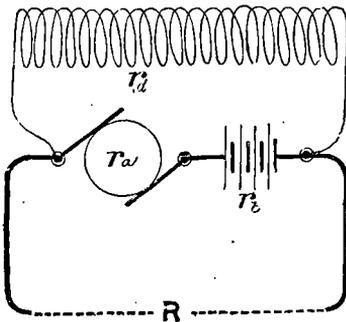


FIG. 164.

Les connexions pour le Cas (III.), (a), sont indiquées dans la fig. 164.

Nous avons ici :

$$\begin{aligned} E &= 4n AH \\ H &= G \times Z i_d. \end{aligned}$$

Soit E_b la force électromotrice indépendante de la pile ou de la machine magnéto, et r_b sa résistance, les autres symboles restant les mêmes que précédemment.

Nous avons alors

$$E + E_b = r_d i_d + (r_a + r_b) i_a,$$

et

$$i_a = i_d + i;$$

d'où

$$4n A G \times Z i_d + E_b = (r_a + r_d + r_b) i_d + (r_a + r_b) i;$$

$$\left\{ 4n A G \times Z - (r_d + r_a + r_b) \right\} i_d + E_b = (r_a + r_b) i.$$

Pour que i soit constant, le terme contenant la variable i_d doit s'annuler; c'est-à-dire qu'il faut donner à la vitesse une valeur n_1 telle que

$$4n_1 A G \times Z = r_d + r_a + r_b,$$

qui est l'équation de condition. Elle peut s'écrire

$$n_1 = \frac{r_d + r_a + r_b}{Z} \cdot \frac{1}{4 A G \times Z};$$

ou, comme dans les cas précédents,

vitesse critique = $\frac{\text{résistances intérieures totales}}{\text{nombre de spires dans les bobines en dérivation}} \times \text{une constante.}$

Il en résulte qu'à la vitesse critique

$$E_b = (r_a + r_b) i,$$

d'où

$$i = \frac{E_b}{r_a + r_b}, \quad [\text{XXXVII.}]$$

c'est-à-dire que le courant constant est égal à celui que pourrait lancer la force électromotrice indépendante à travers les résistances de la portion-armature du circuit; et cette intensité est constante quelles que puissent être les variations de R .

Les connexions pour le Cas (III.), (b), sont données dans la fig. 165; on peut également se reporter à cet égard à la fig. 73, p. 101.

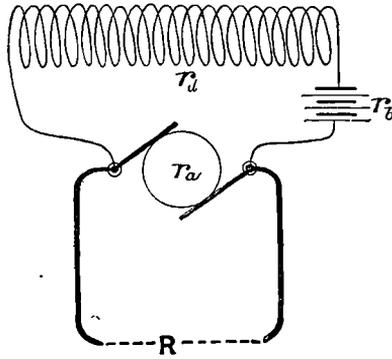


FIG. 165.

Ici nous avons

$$\begin{aligned} E + E_b &= (r_d + r_b) i_d + r_a i_a, \\ &= (r_d + r_a + r_b) i_d + r_a i; \end{aligned}$$

d'où

$$\left\{ 4n \text{ A G } z Z - (r_d + r_a + r_b) \right\} i_d + E_b = r_a i.$$

En posant

$$4n_1 \text{ A G } z Z = r_d + r_a + r_b,$$

on a comme précédemment

$$i = \frac{E_b}{r_a}. \quad [\text{XXXVIII.}]$$

Détermination pratique de l'Enroulement.

Pour déterminer les bobines dans l'un ou l'autre des cas ci-dessus, mettez en court circuit la pile ou la machine magnéto (tournant à une allure convenable) à travers $r_a + r_b$, et observez le courant i . Reliez alors les bornes par une résistance R = au moins vingt fois r_a , et mettez également entre elles une dérivation provisoire de résistance Z = au moins 400 fois r_a . Placez aussi des bobines provisoires sur les électro-aimants, et excitez-les pendant que la machine tourne à une vitesse n_1 , jusqu'à ce que i atteigne sa valeur voulue. Notez le nombre d'ampères-tours ainsi employé à produire le magnétisme nécessaire; soit Q ce nombre. Puis, d'après r_a , r_b , R et i , qui sont tous connus, calculez i_d . En divisant alors le nombre voulu d'ampères-tours Q par le courant dérivé i_d , vous obtiendrez le nombre cherché Z de spires en dérivation; et le diamètre du fil à employer pourra se calculer comme dans les cas précédents.

Cas (IV.). — Dynamo en dérivation + Bobines excitatrices en série : Dynamo « compound ». — Ici encore, deux cas se présentent selon que (a) les bobines en série font partie du circuit principal en dehors de la dérivation, auquel cas la dérivation est prise simplement *sur les balais*; ou que (b) les bobines en série sont comprises dans la portion-armature du circuit, auquel cas, répondant à la dénomination de montage « en longue dérivation », la dérivation est prise *sur les bornes* du circuit extérieur.

Cas (IV.) (a). — Dynamo en Dérivation et en Série. — Les connexions sont les mêmes que celles indiquées dans la fig. 161. Ici nous avons $Z i_a + Y i$ ampères-tours dans les bobines excitatrices. Par suite,

$$E = 4n A G z Z i_a + 4n A G z Y i.$$

Mais

$$E = r_a i_a + r_d i_a$$

et

$$i_a = i_d + i;$$

d'où

$$E = r_a i_a + r_a i + r_d i_a,$$

ce qui donne

$$\left\{ 4n A G z Z - (r_a + r_d) \right\} i_a = (r_a - 4n A G z Y) i.$$

Or, si le terme contenant la variable i_a doit disparaître, il nous faut donner à la vitesse une valeur n_1 telle que

$$4n_1 A G z Z = r_a + r_d,$$

qui est la *première* équation de condition et nous donne

$$n_1 = \frac{r_a + r_d}{Z} \cdot \frac{1}{4 A G z},$$

ou

vitesse critique = $\frac{\text{résistance intérieure nette}}{\text{nombre de spires en dérivation}} \times \text{une constante,}$

comme dans les cas précédents. Et nous avons également

$$4n_1 A G z = \frac{r_a + r_d}{Z}.$$

Mais, si cette condition est remplie, dès lors

$$(r_a - 4n_1 A G z Y) i = 0.$$

c'est-à-dire que, ou bien $(r_a - 4n_1 A G z Y)$, ou bien i est égal à zéro, et l'un des deux est indéterminé. Or, nous savons que i n'est pas nul, et nous savons d'ailleurs que, si dans cette expression particulière i peut être indéterminé, nous pouvons obtenir immédiatement une expression déterminée en introduisant un terme de saturation. Nous devons dès lors avoir évidemment comme seconde équation de condition,

$$r_a - 4n_1 A G z Y = 0,$$

d'où

$$4n_1 A G z = \frac{r_a}{Y}.$$

En égalant les deux valeurs trouvées pour $4n_1 A G z$, nous obtenons

$$\frac{Z}{Y} = \frac{r_a + r_d}{r_a}, \quad [\text{XXXIX.}]$$

comme proportion à observer entre le nombre de spires en dérivation et le nombre de spires en série. Or nous savons que la raison d'économie veut que r_d soit égal à au moins 400 fois r_a , ce qui justifie notre manière de considérer cette disposition comme une dynamo en dérivation plus un petit nombre de spires excitatrices en série. Il est intéressant de comparer ce cas avec celui de la dynamo compound montée pour maintenir une différence de potentiel constante aux balais (p. 260).

Cas (IV.) (b). — Dynamo en longue dérivation + Bobines régulières en série. — Les connexions sont les mêmes que celles de la figure 162, page 263. Les équations deviennent ici :

$$E = 4n A G z Z i_d + 4n A G z Y i_a,$$

$$E = r_d i_d + (r_a + r_m) i_a,$$

$$i_a = i_d + i;$$

d'où

$$\left\{ 4n A G z (Z + Y) - (r_a + r_d + r_m) \right\} i_d = \left\{ (r_a + r_m) - 4n A G z Y \right\} i,$$

ce qui donne, comme ci-dessus, à la vitesse critique n_1 deux équations de condition se résumant en

$$\frac{Z}{Y} = \frac{r_d}{r_a + r_m}. \quad [\text{XL.}]$$

Détermination pratique de l'Enroulement.

Comme dans les cas précédents, l'enroulement sera déterminé par deux expériences faites, l'une en court circuit, l'autre avec une résistance R représentant la charge de travail normal en lampes dans le circuit. Notre point de départ est r_a qui est donné. Nous savons que R doit être au moins vingt fois r_a ; r_d au moins 400 fois r_a , et r_m à peu près les deux tiers de r_a . Employez provisoirement des fils pour représenter ces résistances, et roulez des bobines provisoires sur les électro-aimants, comme dans les cas précédents. Déterminez le nombre d'ampères-tours nécessaire à l'excitation de la machine mise en court circuit, de telle sorte que le courant traversant r_a et r_m seulement ait l'intensité voulue i . Ce nombre, P , divisé par i donnera le nombre de spires en série. Mettez alors en circuit les résistances représentant R et r_d , et excitez de nouveau jusqu'à ce que vous obteniez encore l'intensité i . Le nombre d'ampères-tours Q dans cette seconde expérience représentera l'effet combiné des spires en série et en dérivation. Par suite $Q - P$ représentera le nombre d'ampères-tours que doit donner la dérivation quand les résistances sont en jeu. Calculez d'après cela ce que doit être i_d (ou observez i_d sur un autre ampère-mètre), et en divisant alors $Q - P$ par i_d vous obtiendrez le nombre cherché Z de spires en série. Le diamètre du fil à employer se déterminera comme nous l'avons précédemment indiqué.

Pour plus amples renseignements sur l'enroulement des dynamos « compound » nous renvoyons le lecteur à une série d'articles publiés dans *The Electrician*, en 1883, par M. Gisbert Kapp, et à un autre article de M. W.-A. Esson, dans *l'English Mechanic*, en 1884, ainsi qu'à des articles récents de M. Hospitalier dans *l'Electricien* et de M. Uppenborn dans le *Centralblatt für Elektrotechnik*, qui seront consultés avec intérêt.

Coefficient économique d'une Dynamo Compound quelconque.

La formule suivante embrasse tous les cas de machines auto-régulatrices, si l'on connaît individuellement les courants et les résistances pour toutes les parties des circuits :

$$\eta = \frac{\text{travail utile}}{\text{travail total}} = \frac{i^2 R}{i^2 R + i_a^2 r_a + i_m^2 r_m + i_d^2 r_d}. \quad [\text{XLI.}]$$

i_m et r_m représentent ici respectivement l'intensité du courant et la résistance afférentes aux bobines d'électro-aimants en circuit; et i_a et r_a , celles afférentes aux bobines en dérivation ou séparément excitées. La valeur de η dans la dynamo à différence de potentiel constante est elle-même très constante, et elle est approximativement la même pour toute valeur de R comprise dans ses limites de fonctionnement.

CHAPITRE XVI

THÉORIE ALGÈBRIQUE

Dynamos à Courants alternatifs.

Dans toutes les machines à courants alternatifs la force électromotrice s'élève et s'abaisse suivant des périodes successives très rapides, une onde d'électricité étant lancée dans le circuit dans un sens d'abord, puis dans l'autre, à des intervalles de temps se succédant avec une grande rapidité. Pour calculer cette élévation et cette chute de force électromotrice, il ne faut pas oublier que la rotation des bobines mobiles est censée s'effectuer avec une vitesse uniforme, et que la force électromotrice induite est proportionnelle au taux des modifications dans le nombre de lignes de force induit à travers le circuit. Pour faire intervenir tous les éléments de l'action, il faut tenir compte du nombre de lignes de force *induit par le circuit sur lui-même*.

Considérons une simple boucle de fil parcourue par un courant. Chaque portion de la boucle sera enveloppée d'un tourbillon de lignes de force analogues à celles de la figure 9, et celles appartenant au courant dans l'une des moitiés de la boucle tendront à agir sur le courant qui circule dans l'autre moitié. Cette influence ou cette tendance des lignes de force du courant à agir sur les autres parties du courant se manifeste cependant uniquement lorsqu'il y a modification dans l'intensité du courant ou dans la forme du circuit. Nous savons que tout accroissement dans le nombre des lignes de force qui pénètrent un circuit (comme par exemple dans le cas où

l'on introduit un pôle d'aimant dans une boucle) tend à y développer un courant qui s'oppose au mouvement. Toute augmentation de l'intensité du courant dans la boucle augmentera le nombre des lignes de force qui la traversent, et cette augmentation tendra par elle-même à y développer un courant de sens contraire. D'un autre côté, toute diminution du courant dans un circuit tend, par suite de la réduction du nombre des lignes de force traversant ce circuit, à s'opposer à la diminution du courant. En réalité, un courant agit comme s'il était doué d'inertie, et tend à maintenir constant le nombre de ses lignes de force. Cette inertie du courant dans un circuit est également connue sous le nom d'induction du circuit sur lui-même ou, plus brièvement, de *self-induction* du circuit.

La self-induction dans un circuit qui est, ainsi que nous l'avons vu, le nombre de lignes de force lancé à travers le circuit lui-même par le courant qui le parcourt, est toujours constituée par deux facteurs. Quand nous avons précédemment étudié le cas de l'induction d'un courant dans une boucle que l'on faisait mouvoir dans un champ magnétique extérieur, nous avons laissé de côté la self-induction et regardé le nombre de lignes de force traversant la boucle (que nous avons désigné par N) comme le produit de deux facteurs, la surface A de la boucle, et l'intensité H du champ magnétique dans lequel la boucle était située. Dans le cas de la self-induction, ces deux facteurs seront différents. Le nombre de lignes de force induit par le courant sur lui-même dans une boucle sera proportionnel à l'intensité i de ce courant. Ce nombre sera, pour une simple boucle circulaire, également proportionnel à la surface de la boucle.

Mais des boucles qui ne sont pas circulaires, des boucles composées d'un grand nombre de spires, et des boucles renfermant du fer, exigeraient une étude beaucoup plus compliquée que nous ne pouvons l'entreprendre ici, si nous n'étions servis par une heureuse circonstance. Il nous suffira de dire que, pour une boucle d'un grand nombre de spires, le coefficient de self-induction est proportionnel au *carré* du nombre de spires. Une boucle de deux spires est, au point de vue de la self-induction, équivalente à une boucle simple de surface quadruple. Une boucle d'un grand nombre de spires et montée sur un noyau de fer agit, quelle que

soit sa forme, comme une boucle plus grande. Si nous pouvions déterminer par expérience la surface d'une grande boucle circulaire simple qui, au point de vue de la self-induction, présenterait les mêmes effets, il deviendrait dès lors très facile d'exprimer la self-induction en fonction du courant et de la surface seulement. En fait, les deux facteurs choisis sont l'intensité i du courant et une quantité symbolisée par la lettre U , appelée *coefficient de self-induction*, et qui représente le nombre de lignes de force que posséderait ou induirait sur lui-même le circuit si le courant qui le parcourt avait une intensité d'une « unité absolue ». Il en résulte immédiatement que, si un courant de i unités parcourt un circuit dont le coefficient de self-induction est U , la self-induction totale du circuit sera égale à U fois i ; et le produit $U i$ représentera le nombre total de lignes de force appartenant au circuit lui-même. Il est également évident que, si un courant partant de 0 croît jusqu'à une valeur i , la self-induction moyenne dans le circuit sera $\frac{1}{2} U i$.

Revenant maintenant au cas d'une boucle de surface A , située dans un champ d'intensité H , sous un angle θ (mesuré à partir de la position initiale comme dans la fig. 14 où elle est placée tout à fait transversalement au champ), nous voyons que l'expression adoptée jusqu'ici pour le nombre total N de lignes de force qui la pénètre est incomplète. Sans tenir aucun compte de la self-induction, nous pouvons écrire

$$N = A H \cos \theta.$$

Mais nous savons que, si le circuit est parcouru par un courant d'intensité i , nous devons écrire l'équation dans sa forme complète

$$N = A H \cos \theta + U i. \quad [\text{XLII.}]$$

Notre omission du terme de self-induction dans toutes les équations précédentes n'était justifiée que par deux hypothèses; nous admettions d'abord que la puissance des inducteurs surpassait assez celle des induits pour rendre le second terme négligeable; en second lieu, que les équations obtenues s'appliquaient à des courants *continus*.

Mais nous savons que toute variation de N développe une force

électromotrice induite, et qu'à chaque instant la force électromotrice a pour valeur

$$E = - \frac{dN}{dt};$$

expression dans laquelle nous employons le signe — pour indiquer qu'une augmentation de N produit une force électromotrice inverse ou négative. Nous sommes obligés de tenir compte désormais des diverses quantités en jeu. Tout changement de N , quelle qu'en soit l'origine, développera une force électromotrice. Nous ne pouvons guère modifier la « surface équivalente » A de l'induit, à moins que celle-ci ne soit réduite au cas idéal d'une simple boucle. Π peut être modifié, bien que, pour la plupart des machines à courants alternatifs, les dispositions adoptées assurent la constance de l'intensité Π du champ tant que la dynamo fonctionne, les inducteurs de la machine à courants alternatifs étant excités séparément par un courant constant issu d'une dynamo plus petite, appelée excitatrice (fig. 125, p. 171). Nous ne pouvons davantage, quand la dynamo fonctionne, modifier le coefficient U de self-induction, attendu qu'il dépend des dimensions, de la forme, des bobines et de l'âme de l'induit. Les seules quantités réellement importantes en raison des variations qu'elles ont à subir — les seules quantités dont les variations contribuent aux variations de N — sont donc θ et i . L'angle de position θ varie de 0 à 2π (radians); c'est-à-dire de 0 à 360 degrés sans discontinuité, pour recommencer ensuite à courir de même; son cosinus oscille donc entre +1 et -1. Le courant i varie également d'une certaine valeur maxima $+i_{\max}$ à une valeur négative égale $-i_{\max}$. Nous négligerons toutes les variations des autres quantités, non pas en raison du peu d'intérêt de ces variations — ce qui serait absolument inexact — mais en raison de leur moindre importance pratique. Nous avons dès lors

$$E = - \frac{dN}{dt} = - \frac{d(A\Pi \cos \theta + U i)}{dt}.$$

Supposons maintenant que le temps employé par l'induit pour tourner de l'angle θ soit t — ce sera une petite fraction de seconde. Prenons également T pour représenter la durée d'une révolution;

de sorte que, s'il y a n révolutions par seconde, T sera $\frac{1}{n}$ de seconde.

Dès lors θ sera évidemment la $\frac{t}{T}$ partie d'une révolution entière, et, comme il y a 2π radians dans un cercle, l'angle exprimé en radians sera

$$\theta = 2\pi \frac{t}{T}.$$

En transportant cette valeur dans l'équation précédente et différenciant, nous obtenons

$$E = \frac{2\pi A \Pi}{T} \sin \frac{2\pi t}{T} - U \frac{di}{dt}. \quad [\text{XLIII.}]$$

Étudions attentivement cette équation. Elle montre qu'en circuit ouvert, où i est nul, il n'y a pas de self-induction. De même, si le mouvement de rotation est tellement lent que le taux de changement de i soit inappréciable, le second terme peut aussi être négligé. Le signe — indique également que la portion de force électromotrice due à la self-induction s'oppose à l'autre portion.

Arrêtons-nous par hypothèse un instant à examiner le cas d'un mouvement lent, et négligeons le terme de self-induction; rappelons-nous que $\frac{1}{T}$ est la même chose que n et nous aurons

$$E = 2\pi n A \Pi \sin \theta,$$

comme nous l'avons vu depuis longtemps. De même, la valeur moyenne du sinus entre 0° et 90° étant $\frac{2}{\pi}$ ¹, nous avons, comme valeur moyenne de E ,

$$E \text{ (moyenne)} = 4n A \Pi.$$

Il est également important de noter que, pour un mouvement

1. Ou plus exactement

$$\frac{1}{\theta} \int_0^\theta \sin \theta \, d\theta = \frac{1 - \cos \theta}{\theta},$$

d'où, si $\theta = \pi$, la moyenne est $\frac{2}{\pi}$.

lent de rotation, si la résistance du circuit est R , le courant sera à un moment quelconque

$$i = 2 \omega \frac{A H}{R T} \sin \theta,$$

et la valeur *moyenne* de l'intensité

$$i \text{ (moyenne)} = 4 \frac{A H}{R T}.$$

Cette valeur moyenne de i étant trouvée, nous sommes maintenant en mesure d'examiner le cas où la vitesse de rotation est assez grande pour nous obliger à y faire entrer le terme de self-induction.

Nous rappelant que $E = R i$, nous pouvons écrire

$$R i = \frac{2 \omega A H}{T} \sin \frac{2 \omega t}{T} - U \frac{d \left(4 \frac{A H}{R T} \right)}{d t}.$$

Nous avons ici à résoudre une équation différentielle dont voici la solution

$$i = \frac{2 \omega A H}{T} \cdot \frac{\sin \left(\frac{2 \omega t}{T} - \frac{2 \omega \tau}{T} \right)}{\sqrt{\left(\frac{2 \omega U}{T} \right)^2 + R^2}} + C e^{-\frac{R}{U} t};$$

ou

$$i = \frac{2 \omega A H}{T} \cdot \frac{\sin (\theta + \varphi)}{\sqrt{\left(\frac{2 \omega U}{T} \right)^2 + R^2}} + C e^{-\frac{R}{U} t}, \quad [\text{XLIV.}]$$

dans laquelle φ est l'angle de retard ou la *retardation*, comme disent les Anglais, et est déterminé par la condition

$$\frac{2 \omega U}{R T} = \text{tang } \varphi = \text{tang } \frac{2 \omega \tau}{T}.$$

La symbole τ représente ici le court intervalle correspondant au retard de temps. Le symbole e est employé dans son sens mathématique ordinaire, c'est-à-dire comme représentant le nombre 2,7182, base des logarithmes Népériens; il n'a rien de commun avec la différence de potentiel aux balais pour laquelle nous avons

partout fait usage du même symbole; c'est une constante d'intégration. On peut remarquer que, des deux termes, le second peut être négligé, en raison de ce qu'il ne s'applique qu'à l'augmentation momentanée du courant et qu'il disparaît au bout d'un très court instant. Le premier terme peut aussi s'écrire plus simplement.

Nous rappelant que $\frac{1}{T} = n$, nous avons

$$i = \frac{2 \varpi n A H}{\sqrt{\left(\frac{2 \varpi U}{T}\right)^2 + R^2}} \sin(\theta - \varphi). \quad [\text{XLV.}]$$

Nous voyons par là que notre courant est dû virtuellement à une force électromotrice de valeur $2 \varpi n A H \sin(\theta - \varphi)$, agissant à travers une résistance de valeur $\sqrt{\left(\frac{2 \varpi U}{T}\right)^2 + R^2}$. Maintenant,

quand il n'y avait pas de self-induction à faire entrer en ligne de compte, la force électromotrice était (voir p. 278) $2 \varpi n A H \sin \theta$, et la résistance simplement R . La self-induction a donc pour effet de retarder l'augmentation et la diminution du courant, de sorte qu'il atteint son maximum non pas quand $\theta = 90^\circ$, mais quand $\theta = 90^\circ + \varphi$, ce dernier symbole représentant l'angle de retard. En considérant la valeur de φ ci-dessus donnée, nous voyons que sa tangente est $\frac{2 \varpi U}{R T}$, ou $2 \varpi n \frac{U}{R}$, ce qui nous apprend que le retard augmente

à mesure que la vitesse croît, et qu'il dépend du rapport entre la self-induction et la résistance. Il y aura par suite moins de retard si la machine est construite pour tourner à petite vitesse, et si son coefficient de self-induction est faible comparativement à la résistance du circuit. Ceci indique que le nombre de spires des bobines dans la portion-induit doit être maintenu aussi petit que possible et que le champ magnétique doit être extrêmement puissant : nous retrouvons ici la même règle que pour les machines à courant continu. — On peut également remarquer que la résistance augmente en apparence de R à $\sqrt{(2 \varpi n U)^2 + R^2}$, cet accroissement apparent dépendant à la fois de la vitesse et de la self-induction. La vitesse et la self-induction tendent par conséquent toutes deux à retarder les oscillations de la force électromotrice et à diminuer l'intensité

utilisable du courant. Les grandes vitesses sont par suite à éviter tant au point de vue mécanique qu'au point de vue électrique.

Pour trouver la quantité de travail par seconde W effectuée par la machine à courants alternatifs, on peut se rappeler que

$$W = i^2 R \text{ (watts),}$$

et qu'on doit prendre pour i^2 le *carré moyen* des valeurs de i . Nous en tirons

$$W = \frac{2 \omega^2 A^2 H^2}{R^2 T^2 - 4 \omega^2 U^2},$$

et l'on peut démontrer que le nombre de watts sera maximum quand la résistance du circuit sera réglée à la valeur

$$R = 2 \omega n U,$$

ou quand la résistance apparente sera double de la résistance réelle. Si la vitesse est telle que cette relation entre la résistance et la self-induction soit satisfaite, on aura alors $\tan \varphi = 1$ et le retard sera de 45 degrés. — Ces calculs sont extraits des recherches de M. Joubert.

Dans l'étude précédente, nous avons supposé la machine formée d'un induit simple tournant dans un champ magnétique également simple. Mais, dans la plupart des machines à courants alternatifs (voir pages 168 à 181), le champ est complexe et les bobines de l'induit se succèdent devant une série de pôles symétriquement disposés autour d'un cercle. Dans ce cas, les alternances d'induction se reproduisent plusieurs fois dans une révolution. S'il existe, comme dans la machine Siemens à courants alternatifs représentée figure 125, douze groupes de pôles dont six sont des pôles N., et les six autres intermédiaires des pôles S., toutes les fluctuations périodiques dans l'induction se reproduisent six fois par révolution. Nous devons alors prendre n pour représenter le nombre des alternances par seconde, ou six fois le nombre des révolutions par seconde. De même θ doit être compris comme n'étant pas l'angle réel de position de la bobine à un instant quelconque, mais comme égal à la $\frac{t}{T}$ partie de 2ω ; T étant la période, non pas d'une révolution, mais d'une *alternance*.

Deux des résultats les plus importants dus à M. Joubert peuvent être résumés dans un diagramme, figure 166. Supposons que la courbe A représente l'élévation et la chute du courant induit, telles qu'elles seraient s'il n'y avait pas d'induction. Comme la self-induction dans le circuit de l'induit a pour effet à la fois de retarder l'élévation et la chute de la force électromotrice effective et d'augmenter la résistance apparente, elle déterminera une élévation et une chute de courant analogues à ce qu'indique la courbe B, qui a une amplitude moindre que la précédente et se trouve parallèlement déplacée.

On peut remarquer que le simple retard n'absorbe aucune por-

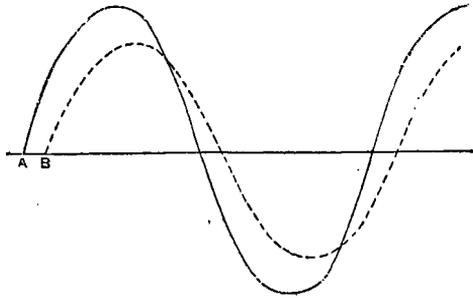


FIG. 166.

tion de l'énergie; il en est de même de la simple introduction des forces contre-électromotrices de self-induction dans le circuit. Si l'induction pouvait être limitée à ces deux effets, elle ne serait pas très préjudiciable; elle rendrait simplement la machine assimilable dans son fonctionnement à une machine plus petite. Mais, malheureusement, l'induction ne peut être ainsi limitée. On la rencontre dans toutes les masses métalliques mobiles de l'induit. On la retrouve dans les noyaux de fer, et même dans l'arbre de rotation. De même, dans les machines à courant continu, son action est surtout préjudiciable dans les bobines élémentaires au moment où elles sont mises en court circuit par leur passage sous les balais, comme nous l'avons dit au Chapitre V; à ce moment la section ainsi mise en court circuit n'appartient pas électriquement au circuit. Tous ces effets d'induction sont accompagnés d'une dépense d'énergie, attendu que les courants engendrés dans un conducteur

quelconque qui ne fait pas partie intégrante du circuit dégénèrent simplement en chaleur. Les machines Lontin à courants alternatifs qui avaient des noyaux de fer massif présentaient à cet égard un phénomène curieux. Quand les bobines de l'induit alimentaient réellement le circuit, des courants prenaient naissance en elles, et dans une certaine mesure également dans les noyaux. Mais quand le circuit était ouvert de telle sorte qu'il n'y avait pas de courant possible dans les bobines, il se développait alors à leur place des courants dans les noyaux. De là, deux conséquences : toutes les fois que la machine tournait à circuit ouvert, les noyaux s'échauffaient à un point dangereux, et *il fallait dépenser plus d'énergie pour faire tourner la machine quand elle ne produisait aucun travail que lorsqu'elle alimentait son nombre maximum de lampes.*

Le D^r Hopkinson a montré¹ que deux machines à courants alternatifs, actionnées séparément, de manière à avoir la même alternance périodique et la même force électromotrice, ne pouvaient pas être reliées en série, leurs courants, dans ce cas, tendant à s'annuler mutuellement ; mais qu'elles pouvaient très bien être couplées parallèlement.

Il n'est pas hors de propos d'observer que, par suite de la self-induction considérable des bobines d'un électro-dynamomètre quelconque construit en fil fin, il n'est pas pratique d'employer un instrument de ce genre comme volt-mètre pour mesurer la différence de potentiel moyenne entre deux points d'un circuit parcouru par des courants alternatifs, et que, quand même le procédé serait pratique, les indications obtenues seraient fausses ; elles dépendraient en effet, non pas seulement du potentiel moyen, de la résistance et de la self-induction, mais encore de la fréquence des alternances. En pareil cas, il vaut mieux se servir soit d'un volt-mètre basé sur la tension d'un long fil fin échauffé par le courant, ou mieux encore faire usage d'un électromètre à quadrants suivant le mode d'emploi imaginé par M. Joubert en 1880. Dans ce dernier cas, la difficulté est d'étalonner la division de l'échelle. Le meilleur

1. *Proceedings of Inst. Civ. Eng.*, avril 1883, « *Some Points in Electric Lighting* ».

moyen d'y arriver est de prendre d'abord des lectures avec un courant continu sur une portion déterminée du circuit dans laquelle il y ait peu de self-induction, où même il n'en existe pas, comme sur un fil fin tendu, et de comparer ces lectures avec d'autres fournies *par le même fil* traversé par des courants alternatifs.

Pour plus amples détails, nous renvoyons le lecteur aux ouvrages suivants : Maxwell, *Philosophical Magazine*, série IV, tome I, pages 474 à 479, 1867 ; Mascart, *Journal de Physique*, tome VI, pages 203 et 297 ; Meyer et Auerbach, *Wiedemann Annalen*, tome VIII, page 494 ; Joubert, *Journal de Physique*, série II, tome II, page 293, 1883. Pour l'étude critique des équations de M. Joubert, voir l'Appendice IV.

CHAPITRE XVII

THÉORIE GÉOMÉTRIQUE DE LA DYNAMO

La méthode graphique, ses diagrammes et plus particulièrement l'emploi de certaines courbes connues sous le nom de *caractéristiques* se prêtent, dans l'état actuel de la science, à la solution de tant de problèmes relatifs à l'établissement des machines dynamo-électriques que le mode de construction et l'utilisation de ces courbes constituent une partie importante de la théorie de la dynamo. Il est même certains points de pratique pour l'étude desquels aucune autre méthode ne saurait lui être substituée avec avantage.

La courbe dite caractéristique joue à l'égard de la dynamo un rôle tout à fait analogue à celui que remplit vis-à-vis de la machine à vapeur le diagramme obtenu à l'aide de l'indicateur de Watt. De même que l'ingénieur mécanicien peut, à la simple inspection d'un diagramme de ce genre, se faire immédiatement une idée des qualités d'une machine à vapeur, l'électricien peut, en jetant les yeux sur une caractéristique de dynamo, juger des qualités et de l'exécution de cette machine. On peut même pousser plus loin la comparaison.

Le diagramme d'une machine à vapeur a deux objets qui, s'ils ont bien quelque relation l'un avec l'autre, sont cependant distincts. Étant donnée l'échelle du diagramme, on est directement renseigné sur la puissance en chevaux-vapeur de la machine, puissance qui dépend uniquement de la surface totale embrassée par la courbe, et nullement de sa forme. Mais, même à défaut d'échelle

connue, les détails de forme de la courbe en ses différents points fournissent à l'ingénieur des indications parfaitement définies sur le fonctionnement de la machine, sur la perfection du vide, la position des tiroirs, le réglage de l'admission, et les conditions de bonne proportionnalité entre les tuyaux et les orifices.

La caractéristique peut également servir à deux fins. Quand on connaît l'échelle à laquelle elle est dressée, on y voit la force en chevaux développée par la dynamo; on peut même y trouver l'indication de ce qu'il faut demander à la machine pour en tirer le meilleur parti. Mais, même sans échelle connue, les détails de forme de la courbe fournissent des renseignements très nets sur les conditions de fonctionnement de la machine : sur le degré de saturation de ses électro-aimants, leur puissance relativement à celle de l'armature, et la valeur respective des divers éléments de la machine à d'autres égards.

Un traité des machines dynamo-électriques ne saurait donc être complet s'il n'exposait pas la nature et les propriétés de cette courbe.

Comme étude préliminaire, qui ne sera pas d'ailleurs sans objet dans la suite, nous commencerons par décrire la courbe à l'aide de laquelle on peut représenter la force électromotrice d'une machine magnéto-électrique en fonction de sa vitesse. A titre de second exemple de l'emploi des courbes, nous donnerons celle qui indique la relation entre l'aimantation d'un simple électro-aimant droit et le courant d'excitation qui l'aimante. Nous terminerons enfin par l'examen des caractéristiques des divers genres de dynamos dans différentes conditions.

Courbe d'une Machine Magnéto-électrique.

La théorie indique que, dans une machine magnéto-électrique, la force électromotrice induite dans l'armature doit être exactement proportionnelle à sa vitesse de rotation, pourvu que le champ magnétique dans lequel se meut l'armature ait une intensité constante. Ceci n'est vrai dans la pratique que si le courant dans l'induit est maintenu constant par une augmentation des résistances

du circuit proportionnelle à la vitesse, et ce, en raison de l'inégale réaction exercée par des courants différents sur l'intensité du champ magnétique. Dans une série d'expériences relatives à l'étude des machines à différentes vitesses, M. Joubert a mesuré la force électromotrice à l'aide d'un électromètre absolu, ce qui éliminait toute perturbation imputable au passage du courant. Les seules réactions possibles étaient celles dues au développement éventuel de courants parasites dans l'âme de l'induit. Il se plaçait ainsi presque exactement dans les conditions théoriques. Ses observa-

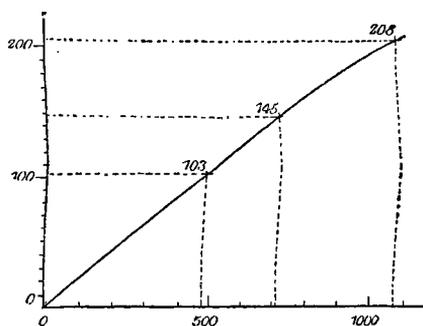


FIG. 167. — Courbe indiquant la relation entre la Vitesse et la Force électromotrice d'une machine Magnéto-électrique.

tions sont relatées ci-dessous et réunies en une courbe dans la figure 167.

La tension de la « courbe » qui est presque une ligne droite montre avec quel degré d'exactitude presque parfaite la condition théorique se trouvait remplie.

Vitesse..	500	720	1070	révolutions par minute.
Force électromotrice.	103	145	208	volts.

Courbe de Saturation d'un Électro-aimant.

Comme preuve nouvelle de l'utilité de la méthode graphique en général, nous donnons ci-dessous le résultat d'une étude de la relation entre le magnétisme d'un électro-aimant droit et l'intensité du courant qui l'excite.

Outre l'électro-aimant, les appareils nécessaires à cette détermination sont les suivants : une batterie assez puissante ; un

ampère-mètre ou tout autre appareil convenablement disposé pour mesurer l'intensité du courant; une série de résistances variables pour modifier à volonté l'intensité du courant, et enfin un magnétomètre de tangentes ou, à son défaut, une boussole à aiguille courte avec un index se mouvant sur une échelle divisée en degrés pour servir de magnétomètre.

La figure 168 montre comment ces différentes pièces doivent être disposées.

L'électro-aimant E est placé soit à l'est, soit à l'ouest (magnétiques) du magnétomètre, son axe perpendiculaire à l'axe de ce dernier, c'est-à-dire dans la direction est-ouest magnétique, l'un de ses pôles tourné du côté du magnétomètre et à une distance

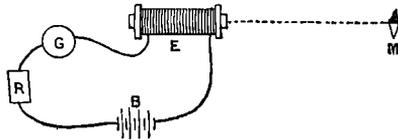


FIG. 168.

convenable de celui-ci. — On fait un certain nombre d'observations avec des courants de différentes intensités, et on relève sur le magnétomètre les forces magnétiques correspondantes.

Chaque valeur du courant donne une certaine valeur de l'action magnétique. On construit alors, avec les valeurs trouvées, la courbe dans laquelle les intensités du courant sont portées en abscisses et les forces magnétiques correspondantes en ordonnées. La courbe présentera en général la forme indiquée par la figure 169. On voit qu'elle se compose de deux parties, l'une qui s'élève sous un angle plus ou moins ouvert, et qui est sensiblement droite, depuis l'origine jusqu'à une certaine distance, et une seconde partie sensiblement droite également, mais inclinée sous un angle beaucoup plus petit, les deux parties étant réunies par une partie courbe. La première partie correspond à ce qui se produit lorsque le fer n'est pas saturé, la seconde à ce qui a lieu lorsque le noyau de fer est pratiquement saturé. La partie courbe intermédiaire correspond au cas intermédiaire où le fer approche de la saturation.

Cette courbe donne la représentation simultanée de deux effets dus, l'un à l'aimantation du noyau de fer, et l'autre à l'action magnétique de la bobine que traverse le courant.

Il est possible de séparer ces deux actions; en enlevant en effet le noyau de fer et en observant l'action de la bobine seule, on obtient une série de résultats qui, reportés sur le diagramme, donnent la droite OB doucement inclinée.

On peut tirer deux conclusions de la forme de cette ligne :
1° elle est peu inclinée, parce que l'action magnétique de la

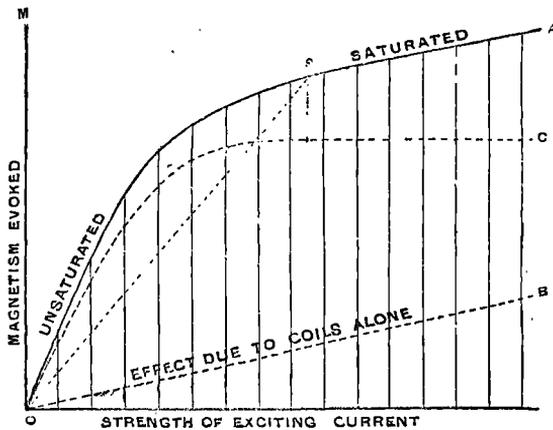


Fig. 169. — Courbe de Saturation d'un Électro-aimant.

STRENGTH OF EXCITING CURRENT	=	Intensité du courant d'excitation.
MAGNETISM EVOKED	=	Magnétisme produit.
UNSATURATED	=	Non saturé.
SATURATED	=	Saturé.
EFFECT DUE TO COILS ALONE	=	Effet dû à la bobine seule.

bobine est faible par rapport à celle du noyau de fer; 2° elle est parfaitement droite, parce que l'effet magnétique du courant dans la bobine est exactement proportionnel à son intensité. Ayant ainsi trouvé la portion de l'effet total due au courant dans la bobine seule, on peut déterminer la portion qui en incombe au noyau seul. En retranchant en effet des ordonnées des points de la courbe OA celles des points correspondants de la ligne OB, on obtient la courbe OC qui montre l'effet du noyau de fer seul.

On remarquera que, dans cette courbe OC, la seconde partie est

presque exactement horizontale; en d'autres termes, le noyau une fois arrivé à saturation est pratiquement incapable de s'aimanter davantage. Toute l'élévation ultérieure de la courbe OA au delà du point critique de saturation S est donc due (ce qui est intéressant au point de vue pratique) à la bobine seule et non pas à une aimantation plus grande du noyau.

La courbe OC nous fait ainsi connaître graphiquement l'état de saturation du noyau sous l'influence de courants de diverses intensités, tandis que la courbe OA représente l'effet magnétique total de ces mêmes courants.

On pourrait obtenir la courbe due à l'effet du noyau seul par un procédé direct, en introduisant entre l'électro-aimant et le magnétomètre une bobine de compensation pour équilibrer exactement la partie de l'effet total due à l'action magnétique directe de la bobine. De semblables dispositions ont été déjà employées par Weber et M. Hughes¹.

Mais dans les dynamos réelles, il est inutile de séparer ces deux actions puisque le champ effectif produit par les électro-aimants est dû à l'action simultanée des noyaux et des bobines.

La quantité importante à connaître dans l'aimantation des électro-aimants d'une machine réelle n'est pas l'intensité du courant d'excitation, mais le produit de cette intensité par le nombre de tours de fil sur la bobine.

L'aimantation produite par un courant de 1 ampère faisant 1 000 tours autour d'un noyau est exactement égale à celle d'un courant de 10 ampères faisant 100 tours, en admettant, bien entendu, que les tours de fil aient le même diamètre moyen dans les deux cas. Ce qu'il faut connaître, au point de vue de la saturation des électro-aimants, c'est donc plutôt le nombre d'*ampères-tours* que le nombre d'ampères.

Voici les résultats obtenus dans une série d'expériences faites avec une bobine exactement de 500 spires sur un noyau de fer de 10 centimètres de long et 1 centimètre de diamètre. Les valeurs de

1. Le plus simple serait, non pas de placer la bobine compensatrice entre la bobine E et le magnétomètre, mais d'employer une seconde bobine *égale*, placée symétriquement de l'autre côté du magnétomètre, à égale distance, et traversée par le même courant, de manière à compenser à chaque instant l'action de la première. (HOSPITALIER.)

la colonne M sont celles du moment magnétique calculées d'après les déviations produites sur le magnétomètre.

AMPÈRES <i>i</i> .	AMPÈRES-TOURS <i>Yi</i> .	MOMENT MAGNÉTIQUE M.
0,00	0	128
0,22	440	1 224
0,39	495	1 920
0,98	490	4 608
1,33	665	5 924
3,65	1825	17 472
4,6	2300	21 088
9,2	4600	27 875
9,4	4700	28 250

Ces chiffres traduits en courbe donnent une figure semblable à la figure 169.

En admettant (voir l'Appendice III, p. 410) que la relation entre le moment magnétique M et les ampères-tours Yi puisse être exprimée par une équation de la forme :

$$M = G \frac{\alpha Y i}{1 + \sigma Y i},$$

on trouve que les valeurs approximatives de $G\alpha$ et de σ sont, dans les expériences précitées :

$$G\alpha = 14,8,$$

$$\sigma = 0,000319.$$

On remarquera que le noyau de fer possédait un léger magnétisme résiduel, puisqu'il produisait une certaine action magnétique même sans courant dans la bobine. Chaque fois que le cas se présente, la courbe part d'un point situé au-dessus de l'origine, et non pas de l'origine même.

Caractéristiques des Dynamos.

L'idée de représenter les propriétés d'une machine dynamo à l'aide d'une courbe caractéristique est due au D^r Hopkinson qui, en 1879, décrivit ces courbes devant l'Institut des Ingénieurs-

Mécaniciens de Londres, et donna la courbe de la machine Siemens représentée dans la figure 170. Le D^r Frölich les employa ensuite dans les travaux qui précédèrent sa communication publiée dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* d'avril-mai 1881. Mais le nom de « caractéristiques » a été donné, en 1881, par M. Marcel Deprez¹

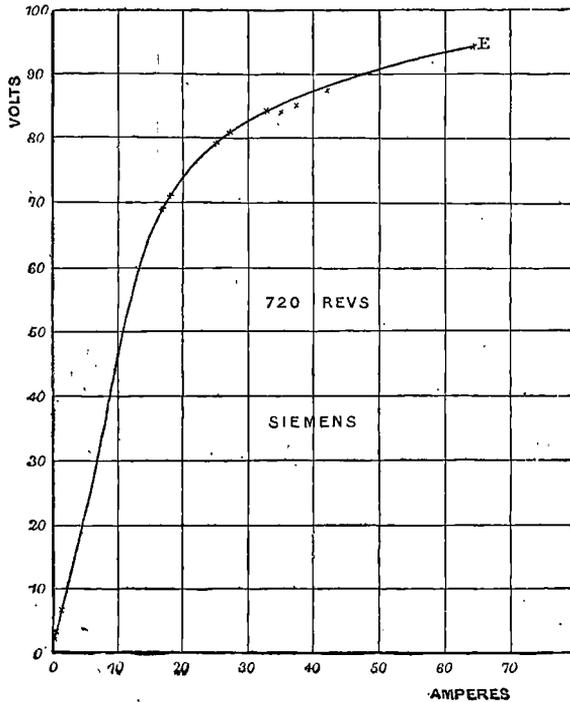


FIG. 170. — Courbe Caractéristique d'une Dynamo en Série.

REVS = Révolutions.

aux courbes du D^r Hopkinson. Le choix heureux de cette expression a été consacré par son adoption générale et a fait attribuer à tort la paternité de ces courbes à M. Marcel Deprez, qui n'en est que le parrain.

Le D^r Hopkinson avait pour objectif la représentation de la relation existant entre la *force électromotrice* et le courant; il déduisit en conséquence de ses observations une courbe dont les abscisses représentent le nombre d'ampères dans le circuit et les

1. Voir *La Lumière électrique*, 3 décembre 1881.

ordonnées les valeurs correspondantes de la *force électromotrice*. Le tableau suivant (emprunté, sauf quelques modifications insignifiantes, au travail du D^r Hopkinson dans les *Comptes rendus de l'Institut des Ingénieurs-Mécaniciens* de Londres, 1879, p. 249) contient les valeurs relevées de l'intensité i du courant et de la force électromotrice E :

EXPÉRIENCES SUR UNE MACHINE SIEMENS A LA VITESSE DE 720 RÉVOLUTIONS PAR MINUTE.

COURANT (en ampères) i	RÉSISTANCE (en ohms) R	FORCE ÉLECTROMOTRICE (en volts) E
0,0027	1025	2,72
0,48	8,3	3,95
1,45	5,33	7,73
16,8	4,07	68,4
18,2	3,88	70,6
24,8	3,205	79,5
26,8	3,025	81,1
32,2	2,62	84,4
34,5	2,43	83,8
37,1	2,28	84,6
42	2,08	87,4

On remarquera que la force électromotrice E est la *force électromotrice totale* engendrée dans la machine; elle ne doit pas être confondue avec la différence de potentiel e entre les bornes, telle qu'on peut la mesurer avec un volt-mètre ou tout autre instrument semblable.

On préfère généralement aujourd'hui porter en ordonnées les valeurs de e au lieu de celles de E ; mais telle n'était pas le mode primitif d'opérer du D^r Hopkinson. Il déterminait E d'après la mesure directe de i qu'il multipliait par la résistance totale du circuit, conformément à la loi d'Ohm $iR = E$. On remarquera également que la machine était une « dynamo en série », les machines montées en dérivation n'étant pas encore à l'ordre du jour à cette époque.

Avant d'aller plus loin, il est intéressant d'étudier les indications fournies par cette courbe. Elle commence en un point un peu

au-dessus de l'origine, ce qui indique la présence d'une petite quantité de magnétisme rémanent dans les électro-aimants. Au début, la courbe s'élève sous un angle très ouvert; elle s'infléchit ensuite et paraît prendre une allure sensiblement droite, mais sous un angle plus fermé que précédemment. A quoi faut-il attribuer cette forme typique ?

On sait que la force électromotrice d'une dynamo ne dépend pas uniquement de sa vitesse de rotation et du nombre des spires de l'induit, mais aussi de l'intensité du champ magnétique. Or, si la vitesse est constante, — et dans les expériences du D^r Hopkinson elle était maintenue à un nombre fixe de 720 révolutions par minute, — la seule variable importante est l'intensité du champ magnétique. A mesure que l'aimantation des inducteurs croît et tend vers son maximum, l'intensité du champ magnétique croît également et tend vers un maximum; il en est de même de la force électromotrice induite. Il fallait par conséquent s'attendre, comme le fait observer le D^r Hopkinson, à ce que la courbe qui fournit la relation entre le courant et la force électromotrice présentât des particularités de forme analogues à celles de la courbe qui indique la relation entre le courant d'excitation et le moment magnétique d'un électro-aimant; il suffit en effet de comparer la « caractéristique » de la machine Siemens en série (fig. 170) avec la « courbe de saturation » d'un électro-aimant (fig. 169) pour reconnaître leur analogie. Il ne faut pas oublier cependant que l'intensité du champ magnétique ne dépend pas uniquement de l'intensité du courant dans les inducteurs; elle est également affectée par le courant qui circule dans les spires de l'induit; et, de plus, la force électromotrice induite dans l'armature est fonction, non seulement de l'intensité du champ, mais aussi de la direction des lignes de force dans ce champ, direction sujette, elle aussi, à des modifications en raison des réactions entre les inducteurs et l'induit.

Certaines perturbations dues à la self-induction dans les spires de l'armature interviennent en outre avec de grandes vitesses et des courants intenses, et empêchent la force électromotrice d'être proportionnelle à l'intensité du champ. La conclusion du D^r Hopkinson, que la caractéristique de la dynamo peut être prise également comme représentation de l'intensité du champ magnétique, ne doit

en conséquence être acceptée que sous réserve de son exactitude dans le cas seulement où ces réactions sont assez faibles pour être négligeables, ce qui arrive rarement.

Le D^r Hopkinson, dans le travail auquel nous avons fait allusion, et dans une autre communication publiée dans le même recueil, en avril 1880 (p. 266), a fait ressortir le grand nombre de déductions utiles qu'on peut tirer de l'examen de ces courbes. Le D^r Frölich a également publié, ainsi que nous l'avons dit, d'importants travaux sur cette question dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* de 1881. D'autres déductions en ont été tirées depuis par M. Marcel Deprez; elles sont résumées dans *La Lumière électrique*, du 5 janvier 1884, à laquelle nous renvoyons le lecteur. Enfin, plus récemment encore, le D^r Hopkinson est revenu sur ce sujet dans une communication faite devant l'Institut des Ingénieurs Civils de Londres, en avril 1883, et qui a pour titre *On some points in Electric Lighting* (De quelques points relatifs à l'éclairage électrique).

Caractéristiques de Puissance en Chevaux-vapeur.

Ainsi que nous l'avons dit au commencement de ce chapitre, si les caractéristiques sont construites à l'échelle, on peut y voir la puissance d'une dynamo en chevaux-vapeur. Le produit du courant par la différence de potentiel est proportionnel au taux de son débit d'énergie électrique. Le produit d'un volt par un ampère est quelquefois appelé *volt-ampère*; on lui a également donné le nom de *watt*. Un watt ou volt-ampère est égal à $\frac{1}{736}$ de cheval électrique.

Pour calculer la puissance ou activité (électrique) développée dans le circuit quand la machine fonctionne à une allure déterminée quelconque, sur un nombre donné de lampes en circuit, on a, par suite, généralement deux mesures à prendre : celle de la différence de potentiel en volts et celle du courant en ampères. Il suffit alors de les multiplier l'un par l'autre et de diviser le produit par 736 pour obtenir la puissance en chevaux. Mais, si l'on connaît la caractéristique de la dynamo à la vitesse en question, il suffit de se reporter à la courbe pour voir de suite quelle est la force élec-

tromotrice qui correspond à un courant donné quelconque. Dans le cas de la dynamo Siemens étudiée par le D^r Hopkinson et dont la caractéristique est représentée dans la figure 170, page 292, supposons la machine travaillant sur une résistance telle qu'elle fournisse 30 ampères à une allure de 720 tours par minute, on voit de suite que la force électromotrice correspondante est de 83 volts.

D'où

$$\frac{83 \times 30}{736} = 3,38 \text{ chevaux-vapeur.}$$

Mais, pour éviter tous ces calculs, on peut réunir sur le même

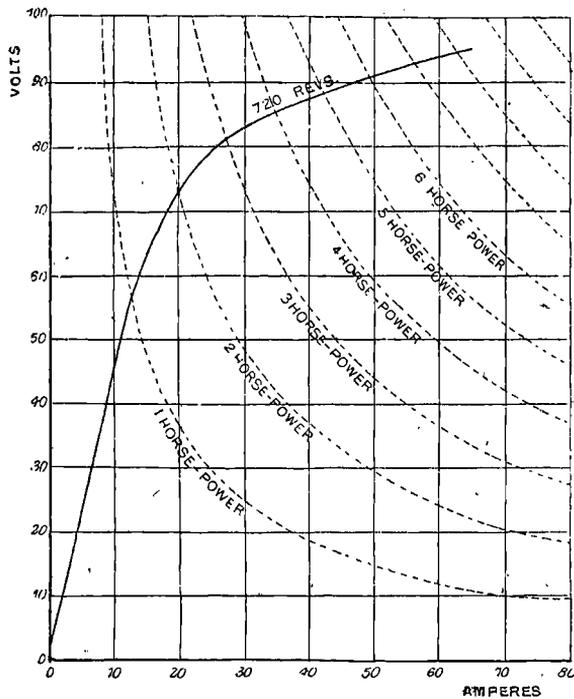


FIG. 171. — Caractéristique avec Lignes de puissance.

HORSE-POWER = Chevaux de force.

diagramme quelques courbes additionnelles coupant la caractéristique et la partageant en égales valeurs de puissance. Ces « lignes de puissance » ne sont autre chose qu'une série d'hyperboles équilatères. La ligne de puissance correspondant à

1 cheval passera par exemple par tous les points pour lesquels le produit des volts par les ampères est égal à 736. Elle passera ainsi par le point correspondant à 73,6 volts et 10 ampères; par le point 36,8 volts et 20 ampères; par le point 14,72 volts et 50 ampères, etc., parce que, dans chacun de ces cas, les produits des volts par les ampères correspondants sont égaux à 736 watts ou à 1 cheval. La ligne de puissance correspondant à 2 chevaux passera par les points pour lesquels les valeurs de ces produits sont égales à 736×2 , ou 1 472 watts, et ainsi des autres.

La figure 171 reproduit la caractéristique de la machine Siemens de la figure 170, mais avec addition des lignes de puissance en chevaux-vapeur.

Ici les volts portés en ordonnées sont ceux de la *force électromotrice totale* E de la machine, et la puissance représente en conséquence l'énergie électrique *totale* fournie par seconde dans le circuit de la dynamo. Si, au lieu des valeurs de E , nous avons pris celles de la différence de potentiel aux bornes e pour construire la courbe, nous eussions obtenu une courbe légèrement différente et représentant la quantité d'énergie électrique développée par seconde dans le circuit extérieur et utilisable sous une forme quelconque.

Nous donnons plus loin (fig. 184) une caractéristique de puissance pour une dynamo montée en dérivation.

Dans tous les cas où l'on a recours à des caractéristiques pour comparer des puissances ou activités, il faut avoir soin de prendre une échelle semblable à celle employée ci-dessus, c'est-à-dire que, quelle que soit la longueur adoptée pour représenter un volt en ordonnées, on devra prendre en abscisses la même longueur pour représenter un ampère. L'inobservation de cette règle, — et malheureusement, on n'a pas jusqu'ici toujours tenu compte de son importance, — rend impossible la comparaison entre les caractéristiques de différentes machines. On peut donner à une mauvaise caractéristique une apparence avantageuse, et *vice versa*, en allongeant ou raccourcissant l'échelle dans l'un des deux sens, comme par exemple en prenant pour les ampères une échelle double de celle des volts. Il est très désirable qu'on arrive à cet égard à une parfaite uniformité.

Caractéristiques « Externes ».

Dans bien des cas, il est plus utile de connaître la relation entre l'intensité du courant et la différence de potentiel « extérieure » aux bornes que la relation entre cette intensité et la force électromotrice totale induite dans l'armature; il est surtout plus facile de mesurer e que E , attendu que le premier se mesure directement à l'aide d'un volt-mètre, tandis que le second ne s'obtient qu'indirectement. On peut, pour distinguer les deux courbes, attribuer le nom de *caractéristique externe* à celle qui représente la relation entre la différence de potentiel et le courant dans le circuit extérieur. Pour la dynamo en série, il est aisé de déduire l'une de ces courbes de l'autre; il suffit de connaître la résistance intérieure de la machine (inducteurs et induit). Dans la dynamo Siemens étudiée par le D^r Hopkinson, en 1879, et dont les figures 170 et 171 donnent la caractéristique *totale*, la résistance intérieure totale était de 0,6 ohm. Cette courbe est reproduite pour la troisième fois dans la figure 172 où elle est marquée E. Or, pour lancer un courant de 10 ampères dans une résistance de 0,6 ohm, il faut une différence de potentiel de 6 volts aux bornes. En examinant la courbe, on voit que la force électromotrice totale correspondant à 10 ampères était d'environ 46,5 volts. Sur ce nombre, 6 étaient employés, comme nous venons de le dire, à vaincre la résistance intérieure, laissant ainsi 40,5 volts comme différence de potentiel disponible entre les bornes. De même, quand le débit était de 50 ampères, il n'y avait pas moins de 30 volts employés à vaincre la résistance intérieure de 0,6 ohm; et comme la valeur de E correspondant à ce courant était de 90,5 volts, il restait 60,5 volts pour e .

Il y a deux manières de représenter ces relations sur le diagramme; la figure 172 les donne toutes deux. La ligne J passe par l'origine et par les valeurs de 6 volts pour 10 ampères, et 30 volts pour 50 ampères. (La tangente de l'angle d'inclinaison de la ligne J est égale à $\frac{6}{10} = 0,6$. Nous verrons plus tard que cette tangente représente la résistance intérieure.) Si donc les hauteurs des ordon-

nées depuis l'axe des x jusqu'à la courbe E représentent la totalité des volts induits, et si les hauteurs des ordonnées de l'axe des x à la ligne J représentent les volts correspondants employés à vaincre la résistance intérieure, il en résulte que la *différence des*

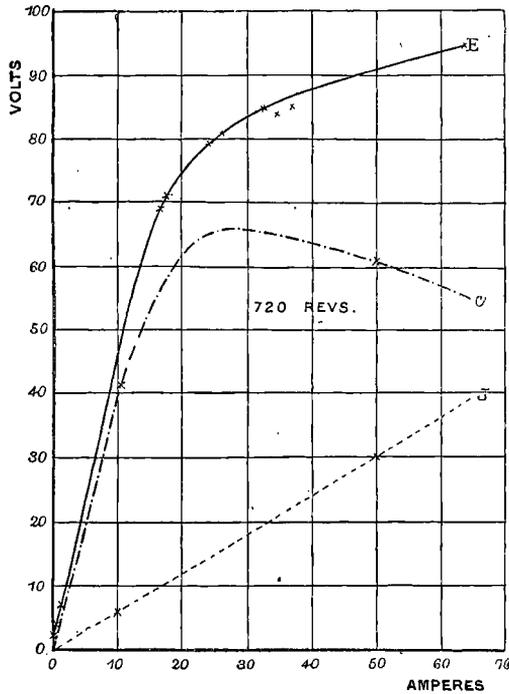


FIG. 172. — Caractéristiques Totale et Externe.

potentiels aux bornes sera représentée par les différences des ordonnées comprises entre les lignes J et E.

Telle est la première manière de représenter ces différences de potentiel.

Le second mode de représentation consiste à déduire à partir des sommets des ordonnées des portions égales aux ordonnées de la ligne J, ce qui revient à soustraire de E les volts internes, que nous avons vus dans la théorie algébrique égaux à $i(r_a + r_m)$, et à obtenir ainsi les valeurs de e . Ces dernières sont réunies dans la courbe e sur la figure; et, comme cette courbe représente la force électromotrice disponible dans le circuit extérieur, elle peut très légitimement être nommée caractéristique « externe ».

**Caractéristique d'une Machine Magnéto et d'une Dynamo
à Excitation indépendante.**

Dans la machine magnéto, l'aimantation des aimants en acier est une quantité déterminée. Ce fait a donné naissance à l'idée généralement répandue que, dans ces machines, la force électromotrice n'était fonction que de la vitesse. Il n'en est rien. Par suite, en effet, de la réaction de l'armature quand elle est parcourue par un courant,

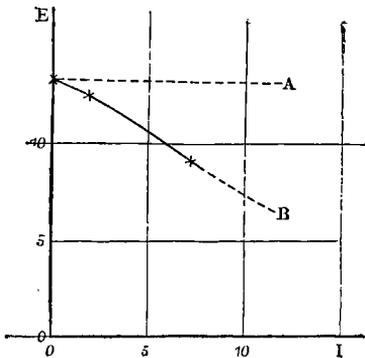


Fig. 173. — Caractéristique d'une Machine Magnéto-électrique.

l'intensité effective du champ magnétique créé entre les inducteurs et l'induit diminue quand ce dernier est parcouru par des courants intenses. Plus le courant dans l'armature est considérable, plus cette réaction est sensible. La figure 173 donne la caractéristique d'une petite machine magnéto-électrique de laboratoire à anneau Gramme. Cette petite machine était capable d'alimenter deux petites lampes Swan de 5 bougies

environ. En circuit ouvert, sa force électromotrice était de 13,1 volts à la vitesse de 1 400 tours par minute. La valeur de E tombait de 13,1 à 12,4 volts quand on empruntait à la machine un courant de 1,8 ampère ; et quand celle-ci était mise en court circuit de manière à fournir 6,1 ampères, la valeur de E s'abaissait à 9,2 volts.

La réaction du courant d'armature était ici très marquée. S'il n'y avait pas eu de réaction de ce genre, la caractéristique aurait suivi la ligne ponctuée A au lieu de s'incliner vers B .

Il ne faut pas oublier que, indépendamment des réactions nuisibles dans le champ magnétique, il se produit dans les bobines mêmes de l'induit des réactions également perturbatrices, dues à la self-induction entre les parties de ces bobines où le courant augmente et diminue d'intensité et celles dans lesquelles circule un courant constant.

Les caractéristiques des machines à excitation indépendante présentent une décroissance analogue de force électromotrice; et les causes en sont exactement les mêmes. Une étude approfondie de ces machines a été faite récemment par M. W.-G. Esson¹, qui donne la courbe ci-contre pour une dynamo à excitation séparée, dont l'armature était un anneau de Pacinotti modifié. La ligne E (fig. 174) représente la force électromotrice totale telle qu'elle serait s'il n'y avait pas de réactions de ce genre. La ligne ϵ représente les valeurs de la différence de potentiel entre les balais de la machine (que nous sommes convenus d'appeler ϵ pour la distinguer de la force électromotrice totale E et de la différence de potentiel e entre les bornes), telle qu'elle serait également sans ces réactions. La courbe B donne les valeurs réellement observées pour ϵ selon le débit de la machine.

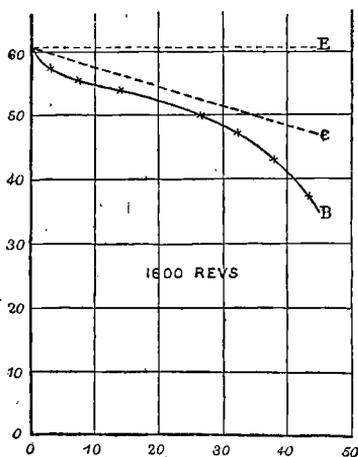


FIG. 174. — Caractéristique d'une Dynamo à Excitation séparée.

Caractéristiques de Dynamos en Série.

La machine Siemens dont la figure 170 représente la caractéristique était une dynamo en série. Nous donnons, à titre de comparaison, dans la figure 175 la caractéristique d'une machine Gramme « A » également montée en série. Cette machine présentait, suivant les mesures prises par M. Marcel Deprez, une résistance de 0,41 ohm pour l'induit et de 0,61 ohm pour les inducteurs. La figure donne deux caractéristiques correspondant l'une à une allure de 1 440 tours par minute, l'autre à une allure de 950 tours. Les courbes de puissance y sont également indiquées. Les chiffres afférents sont consignés dans le tableau suivant :

1. *Electrical Review*, t. XIV, p. 303, avril 1884.

THÉORIE GÉOMÉTRIQUE

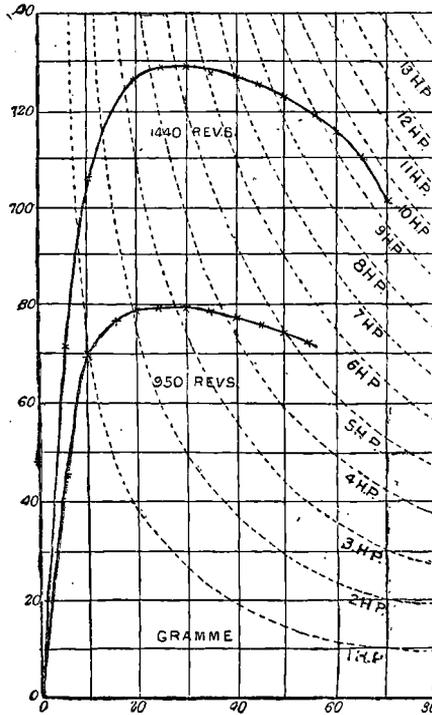


Fig. 175. — Caractéristiques à différentes vitesses.

H-P = Chevaux de force.

EXPÉRIENCES SUR UNE MACHINE GRAMME MONTÉE EN SÉRIE.

COURANT en AMPÈRES.	FORCE ÉLECTROMOTRICE (EN VOLTS)	
	vitesse : 1440 tours.	vitesse : 950 tours.
5	72	45
10	107	70
15	122	77
20	127	79
25	129	79
30	128	79
35	128	79
40	127	78
45	125	76
50	123	74
55	120	72
60	116	»
65	110	»
70	101	»

Dans la dynamo en série, l'aimantation des inducteurs croît avec le courant, et, par suite, la force électromotrice commence également par croître, ce qui fournit la première portion presque rectiligne de la courbe. A mesure que les inducteurs approchent de la saturation la courbe s'infléchit, et, comme les réactions dues au courant dans l'induit prennent alors une importance relativement plus grande, elle s'incline et finit par s'abaisser tout à fait.

La figure 176 représente encore une courbe de dynamo en série. C'est celle d'une petite machine Brush (destinée à alimenter un seul foyer à arc), dans laquelle, par suite de sa grande vitesse, de la masse de fer considérable dans l'induit et de la mise en court circuit prolongée d'une paire de bobines à chaque révolution (voir p. 134 la description de la machine Brush), les réactions nuisibles de l'induit se manifestent par un abaissement

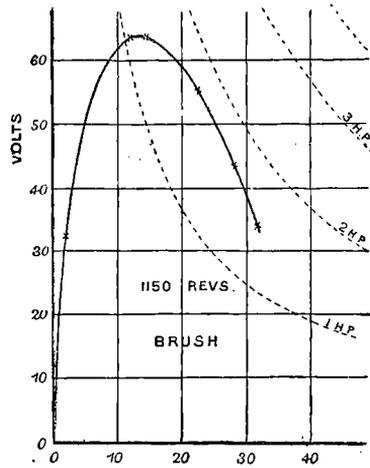


FIG. 176. — Caractéristique anormale.

extraordinaire de la caractéristique. L'aimantation des inducteurs ne diminue certainement pas ainsi après avoir atteint son maximum. Il est d'ailleurs à remarquer que la puissance maxima (pour cette petite machine) est de 1,75 cheval environ, et qu'elle n'atteint cette valeur qu'après l'intervention déjà accomplie de ces réactions nuisibles. Une caractéristique de ce genre est la condamnation complète d'une machine.

Relation entre la Caractéristique et la Vitesse.

Nous savons que la force électromotrice engendrée dans une bobine ou une armature en mouvement serait strictement proportionnelle à l'intensité du champ magnétique, sans l'influence des réactions du courant qui la parcourt. Or, dans une dynamo en série, l'intensité du champ magnétique dépend de l'intensité du

courant; et, si le courant est maintenu constant (à l'aide de résistances convenablement réglées), l'intensité du champ magnétique sera également constante, malgré les changements d'allure de l'armature. Si donc on connaît la caractéristique d'une machine à une vitesse quelconque, on pourra trouver sa caractéristique pour toute autre vitesse en augmentant ou diminuant simplement les ordonnées de la première courbe dans la même proportion. Prenons, par exemple, le cas de la machine Gramme dont la figure 175 donne la caractéristique à la vitesse de 950 tours. La caractéristique à la vitesse de 1 440 tours pourrait se calculer d'après la première en augmentant ses ordonnées dans le rapport de $\frac{1440}{950}$. Ainsi nous voyons d'après

la courbe inférieure que, pour un courant de 20 ampères, sa force électromotrice était de 79 volts. On devrait donc avoir pour la courbe supérieure, au débit de 20 ampères, $\frac{79 \times 1440}{950} = 119,7$ volts.

La force électromotrice réellement observée, à la vitesse de 1 440 tours et pour un courant de 20 ampères, a été de 127 volts. Il y a un léger écart, et en réalité on le constate toujours; les machines dynamos se comportent en effet invariablement comme si un certain nombre de tours appelés *tours morts* ne comptaient pas au point de vue électrique. En admettant qu'ici le nombre des « tours morts » fût de 140, le nombre de volts calculé d'après la théorie concorderait très exactement avec celui fourni par l'expérience.

De la Résistance dans la Caractéristique.

Dans la caractéristique, les ordonnées représentent les volts et les abscisses les ampères. Mais, d'après la loi d'Ohm, des volts divisés par des ampères donnent des ohms. Comment pourra-t-on en trouver l'expression dans la caractéristique? — Supposons par exemple qu'on veuille représenter la résistance du circuit correspondant à un courant particulier quelconque. Soit (fig. 177) la caractéristique de la dynamo en question; on désire connaître la résistance correspondant à l'état de choses pour le point marqué P. Menons l'ordonnée PM et joignons le point P à l'origine. La

ligne OP a une certaine inclinaison dont l'angle est POM . Or PM est égal à la force électromotrice considérée, et OM est l'intensité du courant ;

par suite, d'après la loi d'Ohm,

$$\text{Résistance} = \frac{\text{force électromotrice}}{\text{intensité du courant}} = \frac{PM}{OM};$$

mais

$$\frac{PM}{OM} = \text{tang } POM;$$

donc la

$$\text{Résistance} = \text{tang } POM,$$

ce qui signifie en langage vulgaire que : *La résistance correspondant à un point quelconque de la caractéristique est représentée dans cette caractéristique par la tangente trigonométrique de l'angle que fait avec l'axe des x la droite joignant l'origine au point considéré.*

La figure 177 indique une manière simple de compter cette tangente. Au point de l'axe des x correspondant à 10 ampères, élevons une ordonnée. Une ligne menée de l'origine sous un angle dont la tangente est $=1$, (soit 45°), coupera cette ligne verticale en un point situé à la hauteur marquée 10 volts. L'ordonnée de ce point peut en conséquence

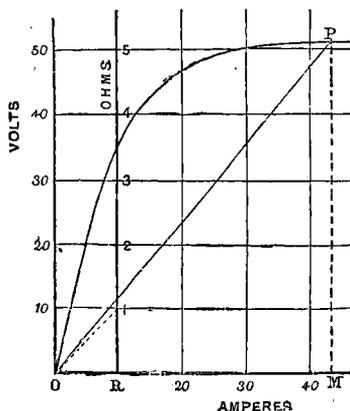


FIG. 177. — Mode de représentation graphique de la Résistance.

être appelée 1 ohm, et, en portant successivement sur cette ordonnée une série de longueurs égales, on constituera une échelle de résistances. Dans la figure 177 la résistance correspondant au point P de la caractéristique est, comme on le voit, de 1,2 ohm environ sur l'échelle des résistances. Or P est situé à 51,3 volts et le courant est de 43,2 ampères. En divisant l'un par l'autre, on obtient 1,18 ohm qui est très sensiblement ce qu'indique la courbe. La construction graphique ci-dessus épargne ce genre de calculs.

Si dans la dynamo réelle on augmentait graduellement la rési-

stance du circuit, le point P se déplacerait en arrière le long de la courbe en se rapprochant de l'origine, les volts et les ampères allant tous deux en diminuant, et la ligne OP se redressant de plus en plus, c'est-à-dire formant avec l'axe des x un angle de plus en plus ouvert. Arrivée à un certain angle d'ouverture, cette ligne OP deviendrait pratiquement tangente à la partie de la caractéristique qui est sensiblement droite, et alors la moindre augmentation de résistance dans le circuit ferait perdre à la machine son aimantation, faute de courant pour exciter ses inducteurs; ainsi s'explique le phénomène connu sous le nom de *désamorçement*.

La résistance peut être représentée d'une façon analogue sur la caractéristique des machines en dérivation (voir p. 312); mais dans ce cas, si la caractéristique est construite sur le courant et la différence de potentiel extérieurs, la résistance ainsi représentée sera la résistance extérieure.

Relation entre la Caractéristique et l'Enroulement des inducteurs et de l'induit.

Supposons qu'on refasse l'enroulement d'un induit de machine en y mettant un plus grand nombre de spires de fil proportionnellement plus fin. Quel résultat obtiendrait-on à la même allure que précédemment? — La résistance de la machine augmentera dans une certaine proportion et sa force électromotrice sera également plus élevée. Supposons que la figure 178 représente la caractéristique de la machine primitive avec N tours de fil sur l'induit : que deviendra-t-elle quand le nombre des spires sera porté à N' ? — Soit P un point quelconque de la première courbe correspondant à une certaine intensité de courant OC . Prenant la seconde armature, faisons varier la résistance extérieure jusqu'à ce que le courant reprenne la même valeur OC . Les électro-

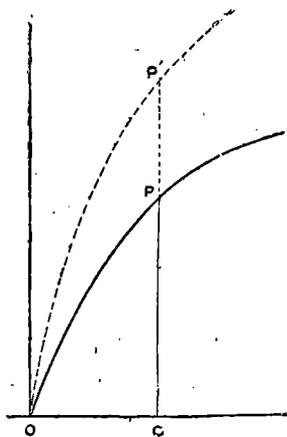


FIG. 178.

aimants seront alors portés exactement au même degré d'aiman-

tation que précédemment; mais il y a N' au lieu de N tours de fil qui coupent les lignes de force magnétiques. La force électromotrice sera par suite également supérieure dans la proportion de $\frac{N'}{N}$.

Menons dès lors $P' C$ de manière à avoir la proportion $\frac{P' C}{P C} = \frac{N'}{N}$;

le point P' appartiendra à la nouvelle caractéristique.

On peut obtenir tous les autres points de la nouvelle caractéristique en prolongeant ainsi les ordonnées de la première dans le même rapport, ce qui fournit un mode de déduction très simple de la seconde courbe. Il est évident d'après ce qui précède que l'augmentation du nombre des tours de fil sur l'induit produit le même effet qu'un accroissement de vitesse de rotation. Ceci prouve qu'on peut construire des dynamos à *faible vitesse* (telles qu'il les faut à bord des navires, etc.), fournissant la force électromotrice voulue, à la condition d'augmenter d'autant le nombre des spires de l'induit. Ce mode d'opérer implique cependant un sacrifice au point de vue économique en raison de l'augmentation de résistance de l'armature.

L'effet des modifications dans le nombre des spires sur les inducteurs peut également être reproduit sur le diagramme de la caractéristique. Supposons que, Y étant le nombre primitif des spires sur les bobines inductrices, le nouvel enroulement de la machine porte ce nombre à Y' spires. Quel en sera le résultat? — Dans ce cas, nous obtiendrons la même force électromotrice en tournant à la même vitesse que précédemment, à la condition que les électro-aimants soient portés au même degré d'aimantation.

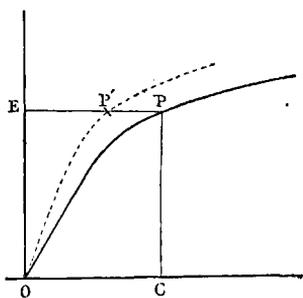


Fig. 179.

Mais, si le courant circule Y' au lieu de Y fois autour des inducteurs, il faudra un courant d'intensité $\frac{Y}{Y'}$ seulement aussi grande que précédemment, pour arriver à la même aimantation. Pour obtenir la nouvelle caractéristique (fig. 179), menons d'un point P quelconque de la première une parallèle $P E$ à l'axe des x . $P E = O C =$ le

courant correspondant à la force électromotrice $O E$. Déterminons P' de telle sorte que $\frac{P' E}{P E} = \frac{Y}{Y'}$; la nouvelle caractéristique passera alors par le point P' , et tous les autres points de la nouvelle caractéristique pourront se déterminer de la même façon par une réduction de leurs abscisses dans le même rapport.

Il est à noter qu'aucun de ces deux procédés n'est applicable aux caractéristiques des machines montées en dérivation.

Courant Critique d'une machine.

Le seul fait que pour une même machine les caractéristiques correspondant à diverses vitesses diffèrent uniquement par l'échelle

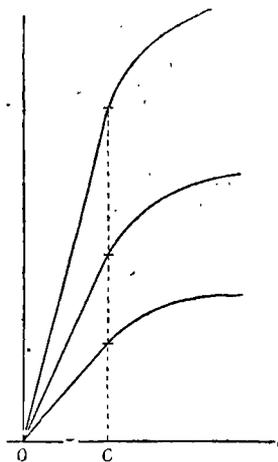


FIG. 180.

relative de leurs ordonnées conduit à une conséquence importante. La première portion de toute caractéristique pour une vitesse quelconque est sensiblement droite jusqu'à un point où, pour cette vitesse, la force électromotrice atteint approximativement les deux tiers de sa valeur maxima. Quand le courant est tel que la force électromotrice est arrivée à cette valeur, la moindre variation, soit dans la vitesse du moteur, soit dans la résistance du circuit, produit une variation considérable dans la force électromotrice, et par suite dans le courant; en conséquence, comme ce point critique correspond toujours à la même intensité (fig. 180), ce courant pour lequel la partie droite de toutes les courbes commence à s'infléchir peut être désigné sous le nom de « courant critique » de la machine considérée. Chaque dynamo a son courant critique propre et ne fonctionne pas bien avec un courant moindre; car ce courant moins intense n'excite pas au même degré les électro-aimants. Nous verrons plus loin que, du moment où à chaque vitesse correspond une certaine inclinaison de la caractéristique, il y a une résistance propre à chaque valeur

de la vitesse pour laquelle on obtiendra le courant critique, et, plus la vitesse sera grande, plus cette résistance pourra être considérable. Il n'y a donc pour une dynamo en série rien d'analogie à une résistance critique : qu'une résistance en effet soit ou non critique, c'est une affaire de vitesse. *Il n'existe non plus rien d'analogie en soi à une vitesse critique pour une dynamo en série*; que la vitesse soit ou non critique, cela dépend en effet de la résistance du circuit.

Application des Caractéristiques.

Les exemples suivants de l'utilisation des caractéristiques sont extraits du travail du D^r Hopkinson publié dans le rapport de l'Institut des Ingénieurs-mécaniciens de Londres, d'avril 1880 :

Détermination de la Vitesse la plus faible possible pour une Dynamo alimentant un Foyer à arc.

On sait qu'avec les charbons usuels et sous la pression atmosphérique ordinaire l'arc voltaïque ne peut se former avec une différence de potentiel infé-

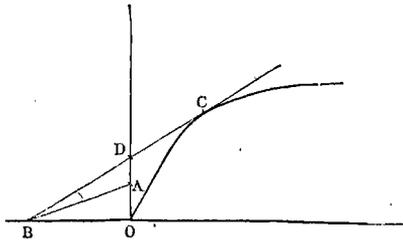


FIG. 181.

rieure à 20 volts environ ; et qu'en fonctionnement courant, avec un arc de 5 à 6 millimètres, la différence de potentiel est de 30 à 50 volts. En adoptant le premier résultat, 20 volts environ, comme limite inférieure de la différence de potentiel, on peut donner un exemple de l'utilisation de la courbe des forces électromotrices à la détermination de la vitesse minima à laquelle puisse tourner une machine donnée pour produire un petit arc. Prenant O pour origine des coordonnées (fig. 181), portons sur l'axe des y la longueur OA égale à 20 volts ; menons AB jusqu'à son intersection avec l'axe des x prolongé du côté négatif, de telle sorte que le rapport $\frac{OA}{OB}$ représente la résistance métal-

lique nécessaire du circuit. Par le point B ainsi obtenu menons à la courbe une tangente qui la touche au point C et coupe l'axe des y en D.

Le rapport $\frac{OA}{OD}$ sera l'extrême limite à laquelle puisse être réduite la vitesse correspondant à la courbe spéciale employée pour qu'il y ait formation d'un arc excessivement petit.

*Emploi de la Caractéristique pour expliquer l'Instabilité
de la Lumière à arc.*

Cette courbe peut être également employée à mettre sous une forme un peu différente l'explication donnée par le D^r Siemens à la Société Royale de Londres, relativement à l'instabilité que l'on

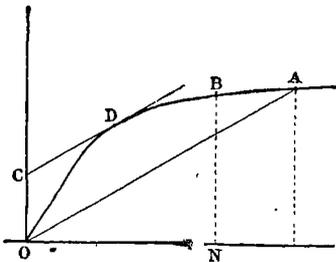


FIG. 182.

constate parfois dans la lumière électrique obtenue à l'aide de machines dynamos ordinaires. — Le rôle de tous les régulateurs usuels est d'écartier les charbons quand le courant dépasse une certaine intensité et de les rapprocher quand il est inférieur à cette limite. Au début les charbons sont au contact. Par l'origine O (fig. 182) menons la droite OA sous

un angle d'inclinaison dont la tangente représente les résistances en circuit autres que celle de l'arc, et rencontrant la courbe en A. L'abscisse du point A représente le courant qui passera si l'on empêche la lampe de fonctionner. Supposons que ON représente le courant pour lequel la lampe est réglée; dès lors, si l'abscisse du point A est plus grande que ON, les charbons s'écartieront. Par le point N menons l'ordonnée BN qui rencontre la courbe au point B; et parallèlement à OA menons une tangente à la courbe au point D. Si le point B est à droite de D ou plus éloigné de l'origine, l'arc persistera; mais si B est à gauche de D ou plus voisin de l'origine, les charbons continueront à s'écartier jusqu'à ce que le courant manque tout à coup et que la lampe s'éteigne. Si B, tout en étant à droite de D, en est très voisin, la moindre réduction dans la vitesse de la machine suffira à éteindre la lampe.

**Relation entre la Caractéristique et les Dimensions
d'une machine.**

Supposons qu'une certaine dynamo de construction donnée ait pour caractéristique à une vitesse déterminée la courbe Oa (fig. 183). Quelle sera la caractéristique d'une machine construite exactement sur le même type, mais dont toutes les dimensions linéaires seront doublées? — Les surfaces seront quatre fois aussi grandes; le volume et le poids huit fois aussi considérables. Il y aura le même nom-

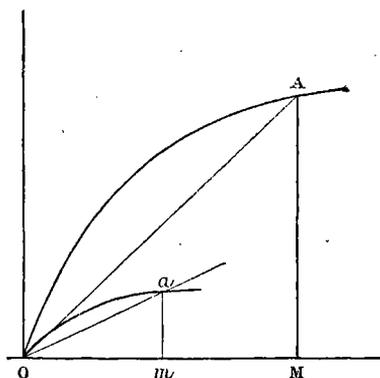


FIG. 183.

bre de tours de fil; mais la longueur du fil étant double et sa section transversale quadruple, les résistances intérieures seront diminuées de moitié. Si les résistances extérieures étaient réglées en vue du même courant que précédemment, la nouvelle machine aurait un champ magnétique égal à la moitié seulement de celui de la première. Si, au contraire, on les règle de manière à produire la même intensité de champ magnétique que précédemment, le courant sera doublé.

Mais, la surface enveloppée par les spires en mouvement étant quadruplée, il y aura quatre fois autant de lignes de force coupées (à la même vitesse), et par suite la force électromotrice sera quatre fois aussi grande. Or il suffit d'avoir un courant double; il faudra donc doubler la résistance extérieure pour avoir un champ magnétique de même intensité. Pour représenter cet état de choses,

prenons le point a sur la caractéristique de la petite machine et menons l'ordonnée am . Prenons ensuite OM double de Om et élevons au point M une ordonnée AM de longueur égale à quatre fois am . La nouvelle caractéristique passera par le point A . La résistance — c'est-à-dire l'inclinaison de OA — sera ainsi double de celle qui correspond à Oa . Les points a et A sont des points similaires en ce qui concerne la saturation du fer des électro-aimants; et c'est cette saturation qui détermine les limites pratiques de fonctionnement économique d'une machine d'un type donné à une vitesse donnée. La force électromotrice étant quadruplée et le courant doublé, on voit que l'énergie électrique développée par seconde sera huit fois égale à celle fournie par la petite machine fonctionnant à la même limite de saturation. Ces conditions peuvent être comparées à celles précédemment trouvées (p. 218) dans la discussion du rapport entre les dimensions et le rendement.

Caractéristique d'une Dynamo en Dérivation.

La dynamo en dérivation comporte deux caractéristiques distinctes : la *caractéristique externe*, dans laquelle les valeurs portées en abscisses sont les intensités en ampères dans le circuit extérieur et celles portées en ordonnées, les volts représentant la différence de potentiel aux bornes; et la *caractéristique interne*, construite sur les volts et les ampères du circuit dérivé. La caractéristique interne de la dynamo en dérivation est absolument identique à la caractéristique externe d'une dynamo en série; elle indique le degré de saturation des inducteurs. Pour la plupart des applications, il est préférable de la construire sur les ampères-tours au lieu des ampères, parce que l'aimantation dépend du nombre de tours de fil sur les bobines aussi bien que des ampères, et que, dans les électro-aimants en dérivation, les ampères sont un faible facteur par rapport au nombre des spires qui joue un grand rôle.

La caractéristique externe d'une machine Siemens en dérivation (décrite par le regretté Sir William Siemens devant la Société Royale, en 1880, et par M. Alexandre Siemens dans le *Journal de la Société des Ingénieurs-Télégraphistes*, mars 1880) est représentée

dans la figure 184; les courbes de puissance y sont également indiquées en pointillé. La puissance extrême de cette machine à la vitesse de 630 révolutions par minute est un peu inférieure à 2 chevaux avec un courant de 30 ampères et une force électromotrice de 47,5 volts.

La courbe de la dynamo en dérivation diffère d'une façon singu-

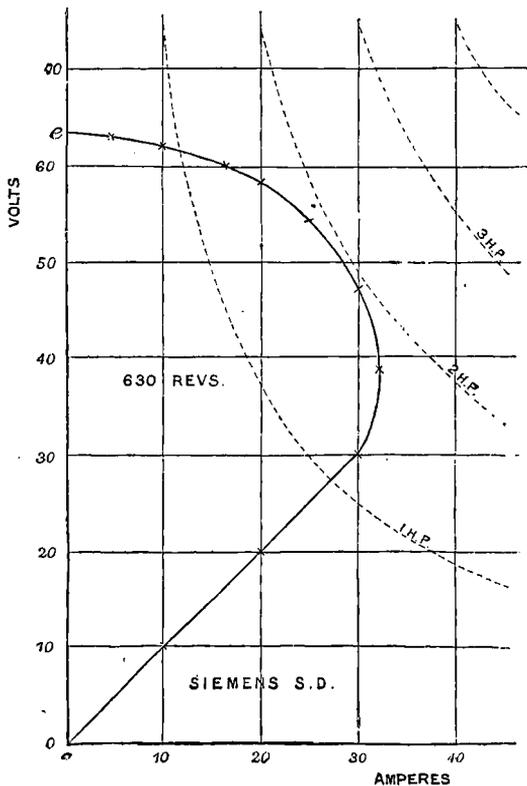


FIG. 184. — Caractéristique Externe d'une Dynamo en Dérivation.

s. D = Shunt Dynamo = Machine en Dérivation.

lière de celle de la dynamo en série. Elle commence par une portion droite ou presque droite qui se renverse ensuite sur elle-même pour revenir éventuellement presque horizontalement vers l'axe des forces électromotrices. La portion droite représente l'état instable correspondant à une valeur du courant dérivé inférieure à sa véritable valeur critique. Le courant critique externe, si l'on peut l'appeler ainsi, est le courant pour lequel la dérivation commence

à produire tout son effet; il est d'environ 30 ampères dans la figure 184. A partir de ce point le courant dérivé agit avec une grande puissance et la force électromotrice croît alors très rapidement. L'inclinaison de la ligne qui forme la première portion de la caractéristique représente la résistance qu'on peut appeler, pour la vitesse considérée, la résistance critique et qui est dans ce cas particulier de 1 ohm environ. Si la résistance du circuit extérieur se modifie en quoi que ce soit, la force électromotrice et le courant varient dans de grandes proportions. Une résistance tant soit peu inférieure fait immédiatement perdre aux électros leur aimantation. Une résistance tant soit peu supérieure détermine de suite une élévation de la force électromotrice au-dessus de sa valeur

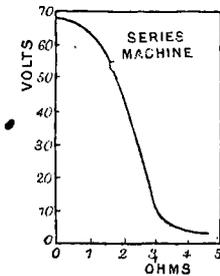


FIG. 185. — Machine en Série.

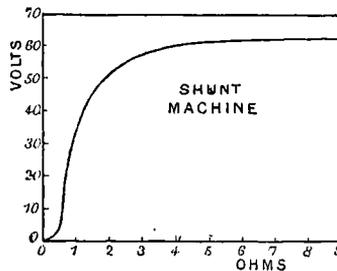


FIG. 186. — Machine en Dérivation.

critique — 30 à 31 volts environ dans le cas actuel. Si la résistance augmente constamment (et que la droite reliant l'origine à la partie courbe se redresse), la force électromotrice va toujours en augmentant et devient maxima quand la résistance est infinie, c'est-à-dire quand le circuit est complètement ouvert et que les bobines en dérivation reçoivent la force électromotrice totale développée dans l'armature. Il est intéressant de suivre le contraste entre cette courbe et celle de la dynamo en série (fig. 170). Dans la dynamo en série, la première partie de la caractéristique est aussi une ligne inclinée, et la tangente de son angle d'inclinaison est également la résistance critique pour la vitesse donnée. Mais la dynamo en série ne fonctionne que si la résistance du circuit extérieur est *inférieure* à cette valeur critique, tandis que la dynamo en dérivation ne fonctionne que si la résistance extérieure est *supérieure* à cette valeur critique. Le contraste est encore plus frappant quand, au

lieu de considérer les caractéristiques ordinaires, on étudie dans ces deux cas les courbes indiquant la relation entre le potentiel aux bornes et les résistances du circuit extérieur. La figure 185 donne la représentation de cette courbe pour la dynamo en série, et la figure 186 la même courbe pour la dynamo en dérivation.

La force électromotrice de la première tombe tout d'un coup quand la résistance dépasse 2 ohms; celle de la seconde s'élève subitement quand la résistance atteint 1 ohm.

Dans la dynamo en dérivation, on n'obtient pas, comme dans le cas de la dynamo en série, la caractéristique pour une vitesse double en doublant les hauteurs des ordonnées. En effet, si pour une vitesse double on règle les résistances extérieures de manière à avoir le même courant extérieur que précédemment, on ne double pas par cela même la force électromotrice parce qu'on n'a plus la même intensité dans le circuit dérivé des électro-aimants. Si, d'un autre côté, on règle les résistances de manière à avoir le même courant dérivé que précédemment et par suite une force électromotrice double, on n'a plus le même courant extérieur. Si, cependant, on modifie

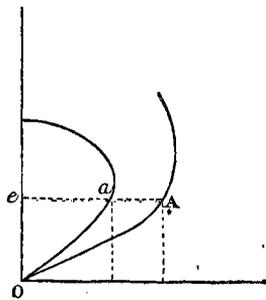


FIG. 187.

la résistance extérieure, en donnant plus d'intensité au courant extérieur de manière à réduire le courant dérivé à sa valeur primitive, l'aimantation reste la même que précédemment. Dans ce cas, à une vitesse double correspondra une force électromotrice très sensiblement double; mais la différence de potentiel dans la dérivation peut rester la même que précédemment, bien que le courant extérieur soit sensiblement doublé. C'est ce qu'indique la figure 187 dans laquelle ea représente le courant extérieur dans le premier cas, et eA le courant extérieur dans le second cas. OA reste une ligne droite, mais à cette vitesse plus considérable son inclinaison est moindre. Cette dernière considération permet de prévoir qu'à des vitesses plus élevées la résistance peut être réduite à une valeur inférieure avant d'atteindre le point critique auquel la machine « se désamorce », c'est-à-dire cesse de fournir l'aimantation à ses électro-aimants.

Courbe du Courant total dans l'Induit.

Dans la dynamo en dérivation, le courant qui circule dans l'induit est égal à la somme des courants dans le circuit extérieur et dans le circuit dérivé; en d'autres termes

$$i_a = i + i_d.$$

Il est facile d'obtenir une courbe donnant la relation entre i_a et e . Dans la figure 188, supposons que $O m i$ soit la « caractéristique

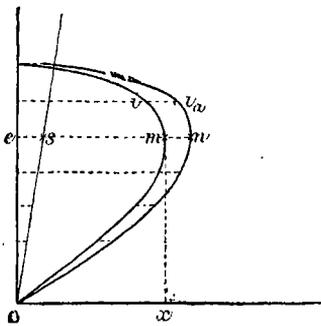


FIG. 188.

externe » pour la vitesse donnée. Prenons sur cette courbe un point quelconque m ; en ce point la différence de potentiel aux bornes est mesurée en volts par la longueur $m x$ ou $O e$, et le courant en ampères par la longueur $O x$ ou $e m$. Menons maintenant la ligne $O s$ sous un angle s $O x$ tel que sa tangente soit égale à la résistance de la dérivation; $e s$ représentera alors le courant dans la dérivation quand la différence

de potentiel est de $O e$ volts. Prolongeons $e m$ d'une longueur égale à $e s$; la ligne entière $e n$ représentera dès lors le courant d'induit ou total i_a pour une différence de potentiel égale à $O e$. On peut ainsi trouver une série de points analogues qui détermineront la nouvelle courbe cherchée $O n i_a$.

Caractéristique Totale de la Dynamo en Dérivation.

En portant sur un système de coordonnées les valeurs de la force électromotrice E et celles du courant total i_a , on obtiendra la caractéristique de l'activité électrique totale de la dynamo.

Traçons, comme dans le cas précédent, la courbe sur e et i_a (fig. 189). Soit p un point quelconque de la courbe, dont le potentiel est $p x$ ou $O e$ et le courant $e p$ ou $O x$. Menons ensuite la ligne $O J$ sous un angle $J O x$ tel que sa tangente soit égale à la résistance de

l'induit. Appelons a , le point où cette ligne coupe l'ordonnée px , ax représentera le nombre de volts nécessaire à la production du courant Ox dans la résistance de l'induit. Si l'on prolonge ensuite px d'une longueur pq égale à ax , la hauteur qx représentera la force électromotrice totale E pour un courant i_u de valeur égale à Ox .

**Caractéristique d'une Dynamo en Dérivation,
avec Aimantation permanente.**

S'il existe du magnétisme rémanent dans les électro-aimants, il y aura induction de force électromotrice, même avant la ferme-

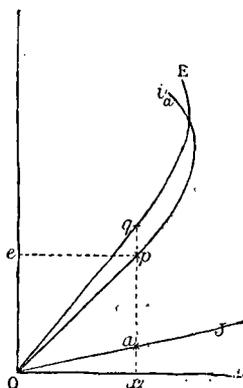


FIG. 189.

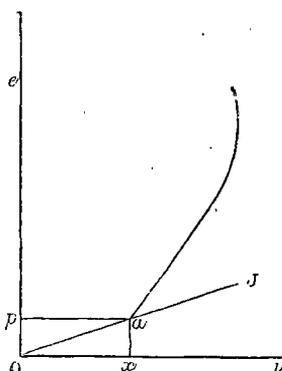


FIG. 190.

ture du circuit dérivé. Dans ce cas, la caractéristique prendra naissance en un point p situé à une petite distance au-dessus de l'origine (fig. 190) et suivra sur une petite longueur une ligne horizontale, comme dans une machine magnéto (voir p. 300) jusqu'à ce qu'elle atteigne un point a déterminé par la rencontre de la ligne pa avec la ligne OJ tracée elle-même suivant une inclinaison représentant la résistance de l'induit. Car, s'il n'y a pas de résistance dans le circuit extérieur (les deux bornes étant mises en court circuit), la seule résistance sera celle de l'armature. Et si Op représente la force électromotrice due à une aimantation permanente, Ox représentera (à la vitesse pour laquelle la courbe est tracée) le courant engendré par cette force électromotrice dans l'induit

quand il n'y a pas d'autre résistance en circuit. A partir du point a la courbe suivra la même marche que dans le cas précédent; tout se passera comme si l'origine était reportée en a au lieu d'être en O .

Caractéristiques des Dynamos Auto-régulatrices.

Dans l'un des chapitres consacrés à la théorie algébrique nous avons examiné les divers modes de combinaisons permettant d'obtenir l'auto-régulation. Ceux qui ont pour objet de maintenir une différence de potentiel constante entre les bornes comportent des dynamos en série *plus* une excitation magnétique indépendante provenant soit d'aimants permanents, soit de piles indépendantes, soit même de bobines inductrices en dérivation. Ceux destinés au maintien d'une intensité constante comportent des dynamos montées en dérivation *plus* une excitation magnétique indépendante due soit à des aimants permanents, soit à des piles indépendantes, soit à des bobines inductrices en série avec l'induit dans le circuit principal. On peut très simplement représenter ces deux conditions à l'aide des caractéristiques; mais il faut avant tout, ne pas perdre de vue deux points essentiels : *le premier*, c'est que la partie de la caractéristique correspondant à l'état de non-saturation des inducteurs est dans tous les cas *très approximativement* une ligne droite; *le second*, c'est qu'on peut modifier à volonté l'inclinaison de cette partie droite de la caractéristique en faisant varier la vitesse de la machine.

Distribution sous Différence de Potentiel constante.

(Voir pour comparaison p. 250)

Nous avons vu (p. 299) qu'on pouvait obtenir, comme dans la figure 172, la différence de potentiel extérieure entre les bornes d'une dynamo en série en retranchant des ordonnées représentant la force électromotrice totale le nombre de volts nécessaire pour vaincre la résistance de l'induit. Il s'agit maintenant d'arriver à rendre cette différence de potentiel extérieure constante.

Or, s'il existe une excitation permanente de magnétisme absolument indépendante de celle due aux bobines inductrices de la

dynamo insérées dans le circuit principal, la caractéristique (fig. 191) ne partira pas du point O , mais d'un point quelconque situé au-dessus de l'origine et à une hauteur variable suivant la vitesse et l'intensité de l'aimantation indépendante. Soit P son point de départ. OP est la force électromotrice entre les bornes quand le circuit principal est ouvert; il n'y a pas alors de courant extérieur, le circuit n'étant pas fermé; — à partir du point P la caractéristique suit sa marche ascensionnelle ordinaire de P à Q . Menons OJ sous l'inclinaison voulue pour qu'elle représente la résistance tant de l'armature que des électros en série. Considérons maintenant une

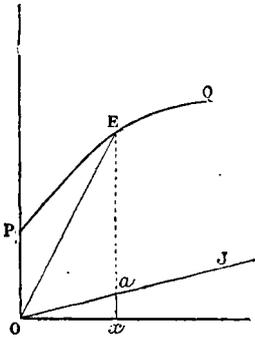


FIG. 191.

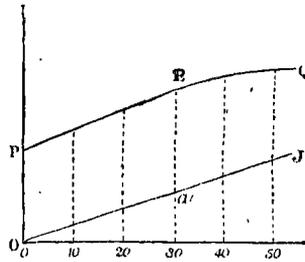


FIG. 192.

ligne OE inclinée sous un angle tel que sa tangente soit équivalente à la résistance totale du circuit à un moment déterminé quelconque. Ex sera alors la force électromotrice totale à cet instant; une portion égale à ax en sera employée à faire passer le courant Ox à travers la résistance de l'armature et des bobines en série; et la portion restante Ea représentera la différence de potentiel aux bornes du circuit extérieur. Le problème se réduit dès lors à ceci : — quelles dispositions faut-il prendre pour que Ea ait toujours la même longueur, égale à OP , quelle que soit l'inclinaison de la ligne OE ? — La seule manière d'arriver à ce résultat est évidemment de régler la vitesse de la dynamo de telle sorte que la portion de courbe de P à Q soit parallèle à OJ . La vitesse étant ainsi exactement réglée, l'inclinaison de la caractéristique sera égale à celle de la ligne OJ , et, comme on le voit dans la figure 192, la différence de potentiel entre les bornes sera constante. On remarquera que ce

résultat concorde avec les déductions auxquelles nous avons été conduits en traitant la question algébriquement, à savoir : que la vitesse critique est proportionnelle à la résistance intérieure, et que la différence constante de potentiel Ea est égale à celle produite par l'aimantation indépendante OP à la vitesse critique.

Il est à noter également que, si la partie considérée de la caractéristique n'est pas droite, c'est-à-dire si les noyaux des électro-aimants ne sont pas éloignés de leur point de saturation, la régulation ne peut pas être parfaite. Si la ligne PQ est courbe, la différence de potentiel pour des courants intenses ne sera pas égale à celle fournie par de faibles intensités. Si l'on suit pour l'enroulement des électro-aimants les indications pratiques données aux chapitres de la théorie algébrique et si les bobines sont établies de manière à amener e au nombre de volts voulu, tant en circuit ouvert (c'est-à-dire OP) qu'en un autre point (soit QJ), où la machine alimente son nombre maximum de lampes, on constatera généralement une différence de potentiel un peu plus élevée pour des nombres intermédiaires de lampes, en raison de la légère convexité de la courbe entre P et Q .

Le raisonnement précédent subsiste, que l'excitation indépendante soit due à une aimantation permanente ou à une combinaison de bobines d'excitation séparée (voir pages 93 et 253), ou que la machine soit montée en « compound » par addition de bobines d'auto-régulation. Dans ce dernier cas, OP représente la différence de potentiel aux bornes due au circuit dérivé seul.

Le cas de la dynamo « compound » peut encore être envisagé à un autre point de vue. Nous avons donné page 314 deux courbes — qui ne sont pas des caractéristiques — indiquant la relation entre la différence de potentiel et la résistance extérieure pour une machine en série et pour une machine en dérivation. L'une de ces courbes (fig. 185) part d'une certaine hauteur et s'abaisse quand la résistance a atteint une valeur déterminée; l'autre suit une marche inverse : elle part d'en bas et s'élève dès que la résistance est arrivée à une certaine valeur. On conçoit que, si une dynamo est montée avec un double jeu d'électros en dérivation et d'électros en série fonctionnant chacun au même potentiel à la même vitesse

et combinés de telle sorte que le nombre d'ohms correspondant à l'abaissement de l'une des courbes soit le même que celui qui correspond à l'élévation de l'autre, ce double enroulement qui

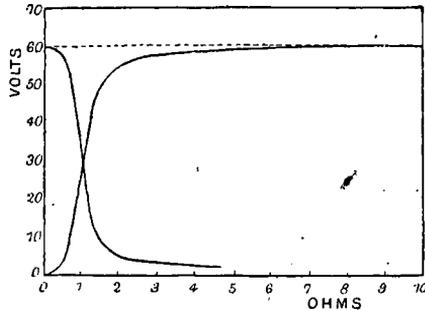


FIG. 193.

constitue la machine « compound » aura pour effet de donner, comme l'indique la figure 193, une différence de potentiel constante. — Il nous reste à voir dans quelle mesure ce résultat est atteint dans la pratique.

Caractéristiques Externes des Dynamos Auto-régulatrices.

L'observation simultanée du courant extérieur i et de la diffé-

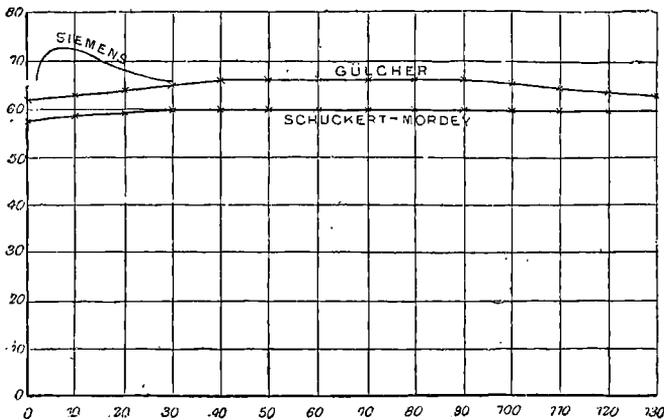


FIG. 194.

rence de potentiel extérieure e permet de construire la caractéristique externe qui, dans une dynamo auto-régulatrice parfaite, serait

une ligne horizontale. Les courbes données dans la figure 194 se réfèrent à une dynamo Siemens¹, à une dynamo « Victoria » Schuckert-Mordey² (voir p. 129) et à une machine Gülcher (voir p. 125).

Distribution à Intensité constante.

Pour une distribution sous courant constant ou à intensité constante, il faut une dynamo en dérivation combinée avec une aimantation indépendante constante fournie, soit par des aimants permanents en acier, soit par un courant indépendant provenant

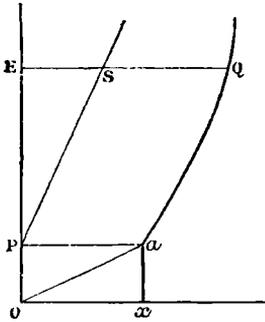


FIG. 195.

d'une source extérieure. ou, finalement, par un certain nombre de spires en série sur le circuit principal ou extérieur et parcourues en conséquence par un courant constant. Ces divers cas peuvent se traiter simultanément à l'aide de caractéristiques convenables.

Nous avons déjà étudié, page 317, la caractéristique d'une dynamo en dérivation avec addition d'une aimantation indépendante. La figure 190 en donne la forme. La caractéristique part du point P au lieu de commencer à l'origine O; elle suit de là une marche horizontale jusqu'en α , la longueur P α représentant le courant lancé à travers la résistance de l'induit par la force électromotrice due à l'excitation indépendante, à la vitesse pour laquelle la courbe est construite, et s'élève ensuite à partir de α , en s'incurvant légèrement, suivant α Q. Si nous menons une ligne horizontale E Q comme dans la figure 195, cette longueur E Q représentera pour le point Q le courant total circulant dans l'armature. Mais on sait que ce courant se partage en deux portions, l'une passant par la dérivation, l'autre allant au circuit extérieur. Il faut trouver quelle est la portion de E Q qui passe dans la dérivation. Pour cela, menons P S

1. RICHTER, *Elektrotechnische Zeitschrift*, avril 1883. — *L'Électricien*, t. V, 15 juin 1883.

2. *Journal of the Society of Arts*, 7 mars 1884.

sous un angle dont la tangente représente la résistance de la dérivation. Cette ligne coupera EQ en S . La portion ES représentera le courant de dérivation, et la portion restante SQ le courant extérieur.

Le problème revient à combiner un système tel que SQ ait toujours la même valeur que Pa quel que soit le point Q choisi. Il est clair que SQ ne peut être constamment égal à Pa sans que Qa soit parallèle à PS . Or nous savons qu'il est possible de donner à la partie droite Qa de la caractéristique une inclinaison quelconque en faisant varier la vitesse. En opérant ainsi jusqu'à ce que Qa soit parallèle à PS , on arrivera à rendre le courant extérieur constant. Ce résultat concorde avec les conclusions précédemment tirées de la Théorie algébrique et ainsi résumées : la vitesse critique doit être proportionnelle à la résistance intérieure de la dynamo tournant à circuit principal ouvert, et le courant constant est égal à celui qui serait développé par l'induit tournant à la vitesse critique sans autre résistance que celle des spires mêmes de l'induit et sans autre excitation des électro-aimants que leur aimantation indépendante.

Application des Caractéristiques aux Dynamos employées à la Charge des Accumulateurs.

Le problème suivant a une grande importance pratique : — *Étant donnée une dynamo employée à charger des accumulateurs et tournant à une vitesse déterminée, quelle sera l'intensité du courant qui la traversera ?*

Le D^r Hopkinson a donné la solution de ce problème pour le cas d'une dynamo en série. — Construisons la caractéristique totale de la dynamo (fig. 196) pour la vitesse donnée. Sur l'axe des y , prenons une longueur OE équivalente à la force électromotrice des accumulateurs, et par le point E menons la ligne CEA faisant avec l'axe des x un angle tel que sa tangente représente la résistance du circuit total, y compris celle des accumulateurs. Cette ligne coupera la caractéristique aux points B et A , et, si la courbe est prolongée au delà de l'origine, au point C également. Cette branche inférieure de la caractéristique n'est autre que la caractéristique

de la machine correspondant au renversement du courant qui la parcourt, et par suite aussi à l'inversion de sa force électromotrice. OL représente alors le courant réel dans le circuit pendant la charge des accumulateurs, OM un courant instable qui pourrait exister momentanément, et ON le courant qui parcourrait le circuit si la force électromotrice des accumulateurs venait à surpasser celle de la dynamo et à la faire tourner en sens inverse, ce qui arrive souvent quand on emploie à cet usage des dynamos montées en

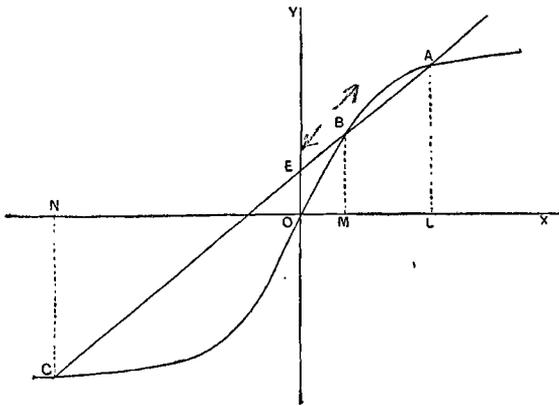


Fig. 196.

série. En effet, dans le cas où les accumulateurs arrivent à être complètement chargés, si leur force électromotrice vient à augmenter, ou si la résistance du circuit vient à croître par suite d'échauffement, ces deux circonstances ont pour résultat inévitable de réduire la force électromotrice effective AL et le courant OL , de sorte que l'aimantation des électro-aimants baisse également, et le point A se rapproche de la position d'instabilité dans l'arc de la courbe.

Avec une machine en dérivation, il n'en est plus de même. — Soit (fig. 197) la caractéristique de la dynamo en dérivation, les valeurs du courant extérieur étant portées le long de l'axe des x et celles de la force électromotrice totale sur l'axe des y . Comme précédemment, menons la ligne CEA . Elle coupe en A la branche positive, et OL est le courant dans le circuit extérieur. Si, maintenant, la force contre-électromotrice des accumulateurs ou la rési-

stance du circuit vient à croître, ces augmentations auront pour effet de faire remonter le point A vers une partie plus élevée de la courbe. Le courant de charge OL pourra diminuer, mais le courant de dérivation augmentera, puisque la force électromotrice AL subira un accroissement. Par suite, avec une dynamo en dérivation, on

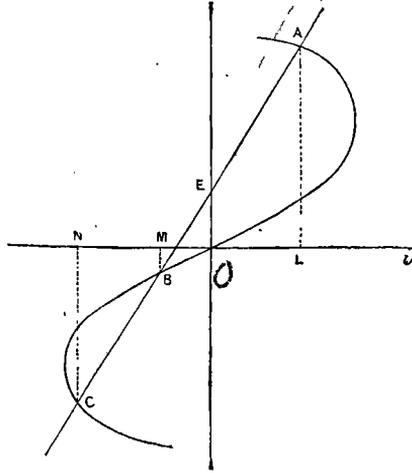


FIG. 197.

n'aura pas à craindre un renversement de marche de la machine, résultant d'une prépondérance prise par les accumulateurs.

Courbes du Couple mécanique.

Le couple mécanique¹ ou moment de rotation est, dans une dynamo montée en série, employée soit comme génératrice, soit comme réceptrice, très sensiblement proportionnel à l'intensité du courant. Nous avons vu, page 101, que le travail par seconde développé par une dynamo ou une réceptrice pouvait s'exprimer mécaniquement par le produit de la vitesse angulaire et du couple mécanique ou que

$$\omega \mathcal{C} = \text{travail mécanique par seconde};$$

1. Le *Torque*, comme disent les Anglais, souvent aussi nommé « couple », « moment du couple », « force angulaire », « force axiale »; également appelé « zug-kraft » dans les mémoires du D^r Frölich, et auquel M. Marcel Deprez a donné dans ses travaux le nom « d'effort statique » ou de « couple mécanique ».

et électriquement par le produit des volts et des ampères, ou que

$$Ei = \text{travail électrique par seconde.}$$

Nous avons vu aussi que, du moment où, dans la dynamo en série,

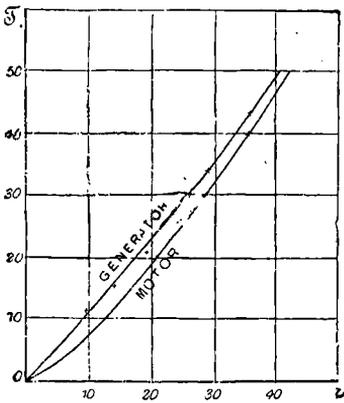


FIG. 198.

Courbes du Couple mécanique.

GENERATOR = Génératrice.

MOTOR = Réceptrice.

Est très approximativement proportionnel à ω , il en résultait que \mathcal{C} était proportionnel à i . Le D^r Frölich a donné¹ des courbes représentant ces relations; il a également conclu de la loi de saturation magnétique que ces lignes devaient, pour de petites vitesses, être légèrement courbes et devenir sensiblement droites pour de grandes vitesses. Il a montré en outre que, pour une réceptrice où le courant dans l'induit vient aider à l'aimantation du champ magnétique, le couple mécanique est plus approximativement proportionnel au

courant que pour une génératrice. Les deux tableaux suivants résumant les résultats de ses expériences sur une machine Siemens montée en série et employée dans les deux conditions :

Condition de génératrice —

Courant	13,3	21,0	28,1	36,8	ampères.
Couple mécanique. . .	10	20	30	40	kilog. à la circonférence.

Condition de réceptrice —

Courant.	2,83	9,56	14,3	19,8	24,3	36,6	ampères.
Couple mécanique. .	5,1	10,61	14,8	21,3	29,6	44,0	kilog. à la circonférence.

Ces résultats sont consignés pour les deux cas dans la figure 198.

Des courbes analogues ont été données par M. Deprez² pour une machine Gramme, et par MM. les professeurs Ayrton et Perry³ pour une réceptrice de Méritens. On peut démontrer que le couple mécanique est proportionnel à la racine carrée de la chaleur

1. *Elektrotechnische Zeitschrift*, t. IV, p. 61, février 1883.

2. *La Lumière électrique*, t. XI, p. 42, 5 janvier 1884.

3. *Journ. Soc. Teleg. Eng. and Electricians*, t. XII, n° 49, mai 1883.

développée dans la génératrice ou la réceptrice. Comme d'ailleurs le courant ne peut être maintenu dans un moteur sans une dépense continue d'énergie égale à $i^2 r$ watts-secondes, il en résulte que le maintien du couple mécanique ou moment de rotation dans une réceptrice coûte une certaine dépense, qui non seulement varie avec la charge réelle de la réceptrice, mais encore est différente suivant les types de machines. Dans un moteur mal conçu, un courant intense parcourant une résistance intérieure considérable (et dépensant par suite une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur) ne produira qu'un faible couple mécanique. Au point de vue économique, il est en conséquence important de savoir au prix de quelle dépense en chaleur le couple mécanique est obtenu. Cette relation peut s'exprimer algébriquement de la manière suivante :

$$\frac{\bar{C}}{\text{dépense en chaleur}} = \frac{E i}{2 \bar{C} n i^2 r} = \frac{E}{2 \bar{C} n i r};$$

r étant la résistance intérieure, E la force électromotrice totale de la dynamo, et n le nombre de révolutions par seconde. Il est toutefois préférable de mesurer \bar{C} par un procédé dynamométrique direct. M. Marcel Deprez, qui a donné à cette importante relation le nom assez singulier (awkward) de « prix de l'effort statique », a également représenté par des courbes les variations de ce rapport avec l'allure de la machine. MM. les professeurs Ayrton et Perry ont démontré dans leur *Mémoire sur les Moteurs électriques* que toute augmentation de vitesse nécessite dans le moteur un courant de plus en plus intense pour la production d'un couple mécanique donné.

Courbe de Variation du Coefficient économique.

Le coefficient économique η (voir p. 216) varie avec les changements de résistance et de courant extérieur. Pour une dynamo en série, on a

$$\eta = \frac{R}{R + r_a + r_m} = i \frac{R}{E} = \frac{e}{E}.$$

La seconde de ces trois expressions de η montre comment on

peut déduire de la caractéristique la courbe du rendement. Considérons en effet un point quelconque de la courbe correspondant à une valeur particulière de i . Il suffira de diviser la valeur correspondante de la résistance extérieure par la force électromotrice totale; le quotient fournira la valeur correspondante de η . — η peut encore s'obtenir par une mesure directe de e et de i et par le calcul de E . — Enfin η peut se calculer d'avance d'après la résistance seule. — Le tracé de la courbe se fera de la manière suivante : — Soit OB (fig. 199) la caractéristique totale de la dynamo, et OJ la ligne représentant par son inclinaison la résistance de l'induit.

Pour un courant donné OP , on a $BP = E$, $AB = e$, et $\eta = \frac{AB}{BP}$.

En choisissant pour unité une hauteur convenable, OE par exemple, et prenant PC égal à la fraction $\frac{AB}{BP} \times OE$, on obtiendra le point C qui sera un des points de la courbe. Il est évident que

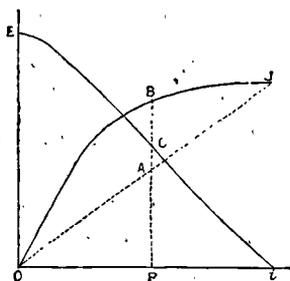


Fig. 199.

cette courbe doit s'infléchir à partir de E où elle est presque horizontale pour venir couper l'axe des x en un point i correspondant à l'abscisse de J .

Pour une dynamo montée en dérivation, le calcul est beaucoup moins facile, mais il conduit à une courbe qui, pour de petites valeurs de i , présente des valeurs de η inférieures à celles qu'on obtient pour de grandes valeurs de cette

même variable. — Si, au lieu de construire la courbe en fonction de η et de i , on la construit sur les valeurs correspondantes de η et de R , on trouvera que, pour de petites valeurs de R , η est faible et croît en même temps que R , jusqu'à ce que R ait atteint la valeur

$$R = \sqrt{r_a r_a'} \sqrt{\frac{r_a}{r_a + r_a'}}$$

pour laquelle η est maximum; après quoi les valeurs de η vont en décroissant pour tomber à zéro quand R est infiniment grand.

Dans une dynamo « compound » montée pour fournir une différence de potentiel constante, la valeur de η est presque con-

stante, quelle que soit celle de R ou de i dans ses limites de fonctionnement.

**Courbe de la Force dépensée pour le Maintien
du Champ magnétique.**

La dépense d'énergie par seconde pour le maintien du magnétisme d'un électro-aimant quelconque peut se calculer aisément; elle est égale, comme on le sait, au produit du carré du courant d'aimantation par la résistance de la bobine. Ainsi, pour une machine en dérivation, l'énergie dépensée par seconde est $i_a^2 r_a$ ou ei_a watts, et la puissance électrique en chevaux-vapeur est $\frac{i_a^2 r_a}{736}$. Il est commode de représenter par une courbe la relation entre cette dépense d'énergie par seconde et l'intensité du courant. Une courbe de ce genre, relevée d'après des épreuves faites sur une dynamo Edison-Hopkinson, est reproduite dans la figure 200. Cette courbe serait une parabole si la résistance était constante, ce qui n'est pas — en raison de l'échauffement croissant avec l'intensité du courant.

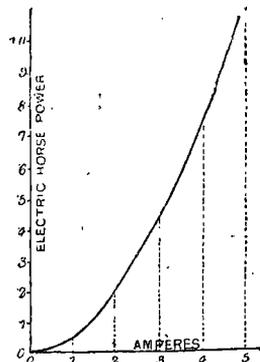


Fig. 200.

ELECTRIC HORSE POWER
= Puissance électrique en
chevaux.

CHAPITRE XVIII

LA MACHINE DYNAMO CONSIDÉRÉE COMME MOTEUR

Dans le premier chapitre de cet ouvrage, nous avons défini les machines dynamo-électriques comme « des machines destinées à convertir l'énergie sous forme de mouvement mécanique en énergie sous forme de courants électriques, ou *vice versa* ». Nous n'avons jusqu'ici envisagé la machine dynamo que dans sa fonction de génératrice de courants électriques. Nous allons en étudier maintenant la fonction inverse, consistant à convertir l'énergie des courants électriques en énergie sous forme de mouvement mécanique.

Un moteur électrique ou, comme on l'appelait autrefois, une machine électro-magnétique est une machine qui effectue un travail mécanique en consommant de l'énergie électrique; et cette définition est vraie, quelle que soit la nature de l'organe magnétique constituant la partie fixe de la machine, aimants permanents en acier ou électro-aimants. Par le fait, une dynamo quelconque, à excitation indépendante ou auto-excitatrice, peut inversement servir de moteur, bien que certaines machines soient, comme nous le verrons, mieux appropriées à cet objet. Mais, que leur champ magnétique soit dû à de l'acier aimanté d'une façon permanente ou à du fer momentanément aimanté, tous ces moteurs sont en principe électro-magnétiques, c'est-à-dire qu'ils renferment une partie, soit fixe, soit mobile, qui constitue un électro-aimant et, comme telle, exerce ou subit une attraction magnétique.

Un aimant attire, comme chacun sait, le pôle contraire d'un autre aimant et le fait tourner s'il est mobile. Nous savons égale-

ment que tout aimant placé dans un champ magnétique tend à tourner sur lui-même et à se placer dans la direction des lignes de force. Comme première représentation de la nature des forces mises en jeu dans le champ magnétique prenons le cas de la figure 201. Nous avons d'abord ici un champ magnétique simple produit entre deux pôles d'aimants énergiques, l'un à droite, l'autre à gauche. Si entre ces deux pôles on maintient une aiguille aimantée à angles droits avec les lignes de force et qu'on projette de la limaille de fer dans le champ magnétique, le spectre ainsi formé révèle clairement les actions en jeu. Faraday, qui nous a appris le

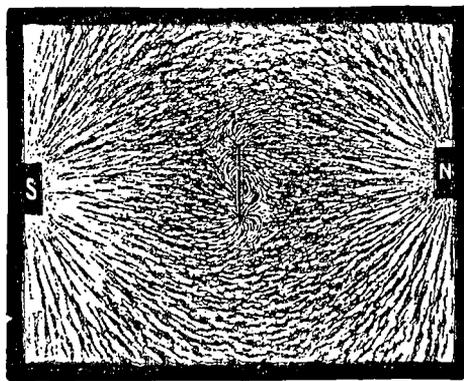


Fig. 201. — Action d'un champ magnétique sur une Aiguille aimantée.

premier la signification de ces mystérieuses lignes de force, nous a enseigné que nous pouvions les considérer comme tendant à se contracter ou à se raccourcir. Or il suffit de jeter les yeux sur la figure 201 pour voir que le raccourcissement des lignes de force doit avoir pour effet de faire tourner l'aiguille aimantée sur elle-même de 90° autour de son centre, car les lignes de force tendent à l'entraîner, d'une façon très marquée, à droite pour la partie supérieure, et à gauche pour la partie inférieure.

On conçoit dès lors aisément que la découverte de l'électro-aimant, qui a donné pour la première fois un aimant dont on pouvait à volonté faire varier la puissance, ait immédiatement fait entrevoir à des esprits ingénieux la possibilité de construire une machine électro-magnétique dans laquelle un électro-aimant, placé dans un champ magnétique, fût entraîné circulairement et main-

lenu ensuite en mouvement continu par le renversement du courant à un moment convenable. En fait, une simple spire de fil, traversée par un courant et placée dans un champ magnétique, subit une action de ce genre et est entraînée circulairement comme un aimant. La figure 202 montre comment, ici encore, les lignes de force révèlent l'action exercée. Le champ magnétique est, comme précédemment, produit entre les extrémités de deux forts aimants. Les deux petits cercles indiqués sur la figure représentent deux trous percés dans une lame de verre et par lesquels le fil qui conduit le courant débouche en avant pour repasser ensuite

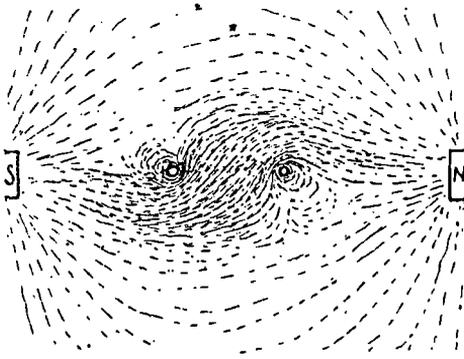


Fig. 202. — Action d'un champ magnétique sur un Fil parcouru par un courant.

en arrière. On peut remarquer combien les lignes de limaille de fer qui, s'il n'y avait pas de courant, passeraient simplement de gauche à droite sont déviées dans leur marche. Si ces lignes peuvent se raccourcir, elles doivent, de toute nécessité, tordre sur elle-même la boucle de fil et la faire mettre à angles droits par rapport à la position où elle est située sur la figure. Tout circuit traversé par un courant tend à se placer de manière à embrasser autant de lignes de force que possible. Il est évident que, pour arriver à ce résultat, la boucle employée dans la représentation de la figure 202 doit tourner sur elle-même de manière à se mettre à angles droits par rapport à la position qu'elle occupe sur la figure. C'est exactement sur ce principe qu'a été construit le premier moteur électrique de Ritchie, bien connu sous diverses formes comme appareil de fond de tout cabinet de physique, mais qui n'est guère en réalité qu'un jouet.

Jacobi a fait un grand pas en avant en construisant, en 1838, sa machine multipolaire représentée par la figure 203. Ce moteur, destiné par lui à son bateau électrique, était formé de deux robustes flasques en bois, sur chacune desquelles était fixée en couronne une douzaine d'électro-aimants à pôles alternés. Entre ces électro-aimants était monté sur un disque de bois un autre jeu d'électro-aimants que faisaient tourner l'attraction et la répulsion alternatives des pôles fixes ; le courant qui parcourait les électro-aimants mobiles était renversé régulièrement au moment où ils passaient

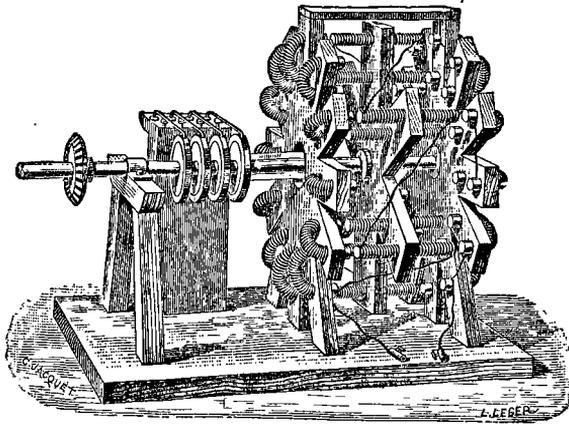


FIG. 203. — Moteur électrique de Jacobi.

devant les pôles des électro-aimants fixes, au moyen d'un commutateur formé, suivant la disposition adoptée par Jacobi, de quatre roues dentées en laiton dont les dents étaient isolées l'une de l'autre par des pièces d'ivoire ou de bois intercalées. Le moteur de Jacobi est, en réalité, un type fort avancé de dynamo, et diffère très peu, dans sa conception, de l'une des meilleures formes de la machine de Wilde¹.

Un appareil rotatif, encore antérieur, mais resté, comme celui de Ritchie, à l'état de simple jouet, était la roue de Sturgeon (fig. 38), décrite en 1823. Cet instrument, intéressant comme le précurseur de la dynamo à disque de Faraday, est le type d'une

1. Celle de Wilde a été cependant conçue comme génératrice, et celle de Jacobi au contraire comme moteur ou réceptrice ; mais cette dernière engendrerait aussi bien des courants si elle était actionnée par une force mécanique.

importante catégorie de machines, comportant un simple contact à glissement et n'ayant pas besoin de commutateur.

On peut citer comme quatrième classe de moteurs ceux dans lesquels la partie mobile, au lieu de tourner sur un axe, est soumise à un mouvement d'oscillation. Le professeur Henry, auquel l'enfance de l'électro-magnétisme est redevable de tant d'inventions, a construit, en 1831, un moteur à balancier oscillant alternativement en arrière et en avant sous l'action intermittente d'un

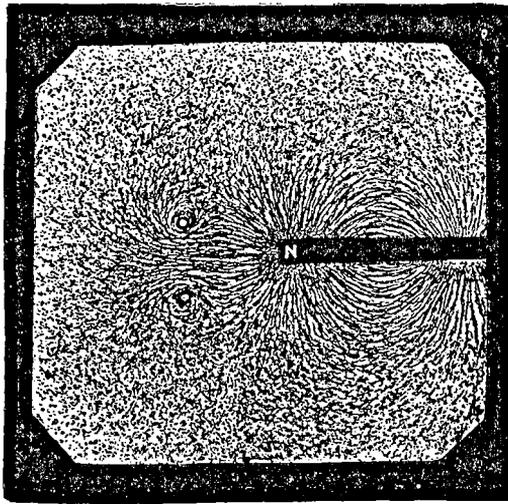


Fig. 204. — Pôle d'aimant attiré dans un circuit parcouru par un courant.

électro-aimant. — Le moteur de Dal Negro (1833) appartient également à cette catégorie; dans ce moteur, une tige d'acier empruntait son mouvement d'oscillation à l'action des pôles d'un électro-aimant entre lesquels elle était placée et déterminait par son mouvement la rotation d'une manivelle à laquelle elle était reliée par une bielle. — Page introduisit une notable amélioration dans ce type de machine en employant pour électro-aimants des bobines creuses; des noyaux de fer alternativement attirés à l'intérieur de ces bobines donnaient lieu à un mouvement d'oscillation dans un sens et dans l'autre. Les moteurs de ce genre sont une admirable illustration de l'une des lois de l'électro-magnétisme, formulée d'abord par Gauss et développée ensuite par Maxwell, relative à

l'action d'un circuit sur un pôle magnétique, action qui tend à rendre maximum le nombre des lignes de force magnétiques traversant le circuit. Ici encore l'emploi de la limaille de fer permet de faire comprendre par un spectre magnétique cette proposition abstraite de géométrie électrique.

Dans la figure 204, le pôle N. d'un barreau aimanté est placé en face d'un circuit, d'une boucle de fil, parcouru par un courant et qui débouche d'une plaque de verre par le trou inférieur, pour repasser en arrière par le trou supérieur. L'inspection de la figure

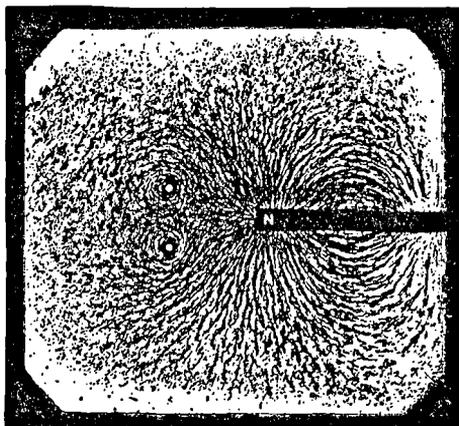


FIG. 205. — Pôle d'aimant repoussé par le circuit dans lequel le courant est renversé.

montre bien la tendance à amener autant de lignes de force que possible dans le champ du circuit. Si maintenant on renverse le courant, qu'arrive-t-il? — La figure 205 répond à la question; car nous trouvons alors que les lignes de force de l'aimant, au lieu d'être attirées dans l'intérieur du circuit, en sont repoussées. Par le fait, dans l'un des cas le pôle est attiré, dans l'autre il est repoussé.

L'idée de Page a été ultérieurement développée par Bourbouze, qui construisit son curieux moteur (fig. 206) bien connu pour son analogie avec un ancien type de machine à vapeur à balancier. Nous y retrouvons en effet le balancier, la manivelle, le volant, la bielle, et même l'excentrique et le tiroir. Mais, pour cylindres, nous avons quatre électro-aimants creux; pour pistons, des noyaux

de fer alternativement attirés et repoussés, et pour tiroir, un commutateur, qui, en entraînant une paire de ressorts platinés sur une surface plano formée de trois lames de laiton séparées par deux bandes d'ivoire isolantes, renverse chaque fois le sens des courants dans les bobines des électro-aimants. Cette machine est extrêmement ingénieuse; mais, au point de vue du rendement, elle est bien inférieure à un grand nombre d'autres moteurs. On ne peut, en effet, malheureusement assimiler la conception des machines dynamo-électriques à celle des machines à vapeur.

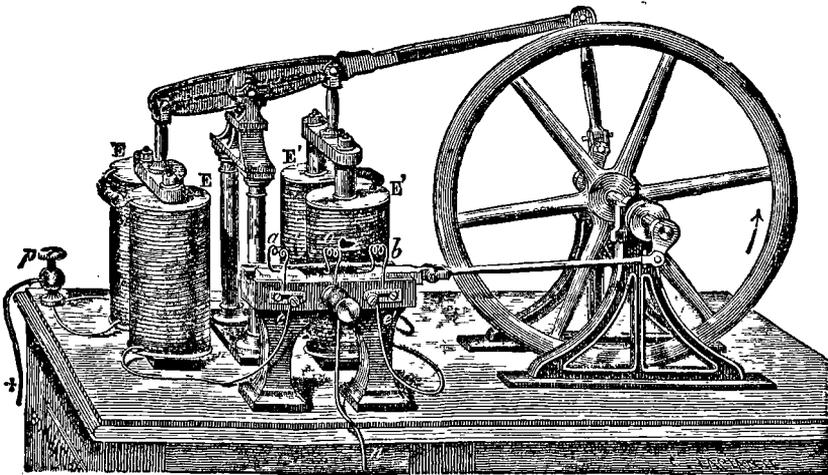


FIG. 206. — Moteur électrique de Bourbouze.

On doit encore à M. Froment une cinquième classe de moteurs électriques, dans laquelle des barreaux de fer doux parallèlement disposés à la périphérie d'un tambour, suivant ses génératrices, sont attirés, l'un après l'autre, par un ou plusieurs électro-aimants déterminant ainsi la rotation continue du tambour.

Enfin, parmi les différentes classes de moteurs, nous pouvons citer un type dans lequel la partie mobile est renfermée dans un bâti en fer avec lequel elle n'est pas concentrique et dont elle s'approche successivement dans son mouvement de rotation. De petits moteurs, basés sur ce principe de « rapprochement oblique », ont été imaginés par Wheatstone et longtemps employés à faire tourner des tubes de Geissler et à effectuer d'autres expériences de

lumière. Plus récemment, MM. Trouvé et Wiesendanger ont cherché à appliquer ce principe à des moteurs de dimensions supérieures, mais le résultat n'a pas répondu à cette conception un peu ambitieuse; il vaudrait mieux en effet rapprocher l'armature des pièces polaires de l'électro-aimant.

Il est impossible, dans les limites de cet ouvrage, de passer en revue le dixième seulement des nombreuses découvertes et inventions, ou des intéressantes et curieuses machines qui ont marqué les diverses étapes du sujet qui nous occupe. Je pourrais dire comment Page, après avoir inventé sa machine en 1834, réussit à construire en 1852 un moteur d'assez grandes dimensions pour actionner une scie circulaire et un tour. Je devrais mentionner le moteur électrique de Davidson, qui, en 1842, lui permit de faire marcher une voiture à la vitesse de 4 milles (6, 5 kilomètres environ) à l'heure, entre Édimbourg et Glasgow. Je pourrais décrire la machine construite en 1849, à Liverpool, par Soren Hjörth, et qui avait une puissance de 10 chevaux.

Mais ces premiers essais n'aboutirent à rien, pour deux raisons : d'abord, à cette époque, on ne connaissait aucun moyen économique de produire les courants électriques; on n'admettait d'ailleurs pas encore la grande loi physique de la conservation de l'énergie, et l'on ne pouvait prévoir ses conséquences de première importance en ce qui touche la théorie des machines électriques.

Tant que les piles voltaïques ont été les seules sources pratiques de courants électriques, on n'a pu espérer un fonctionnement économique des moteurs électriques. Une pile voltaïque, dans laquelle les courants électriques sont produits par la dissolution du zinc dans l'acide sulfurique, est en effet une source d'énergie très dispendieuse. Sans parler du prix de l'acide, le zinc — qui est le véritable combustible de la pile — coûte plus de vingt fois autant que le charbon, tout en étant un combustible bien inférieur, car, tandis qu'un gramme de zinc développe une quantité de chaleur équivalente à un travail de 550 kilogrammètres environ, un gramme de charbon en fournit à peu près l'équivalent de 3383 kilogrammètres.

On avait cependant constaté un fait, très décourageant en apparence, qui, s'il eût été interprété logiquement selon le principe de la conservation de l'énergie, se fût au contraire présenté comme plein d'encouragements. En plaçant un galvanomètre dans le circuit avec le moteur électrique et la pile, on observait en effet que, pendant le mouvement du moteur, il était impossible de faire passer dans les fils un courant égal à celui qui les traversait quand le moteur était au repos. Or, deux causes seulement peuvent s'opposer au passage d'un courant dans un circuit; ce ne peut être qu'une résistance d'obstruction ou bien une force contre-électromotrice. On s'arrêta tout d'abord à l'idée que le moteur en mouvement offrait au passage du courant une résistance supérieure à ce qu'elle était quand il se trouvait au repos. Mais le génie de Jacobi lui permit de reconnaître que la diminution de courant observée était due en réalité à ce que le moteur, par le fait même de sa rotation, commençait à fonctionner, comme dynamo, pour son propre compte et tendait à développer dans le circuit un courant de sens contraire à celui qui déterminait son mouvement. Plus rapide était son allure, plus était grande la force contre-électromotrice (ou « la force électromotrice de réaction ») développée. En réalité, le principe de la conservation de l'énergie exige qu'il en soit ainsi.

On sait que, dans le cas inverse, quand on emploie une force mécanique à actionner une dynamo susceptible d'engendrer elle-même des courants, dès que ces courants prennent naissance, c'est-à-dire dès que la machine commence à effectuer un *travail* électrique, elle absorbe immédiatement une quantité d'énergie beaucoup plus considérable que dans le cas où elle n'effectue aucun travail électrique. En d'autres termes, une réaction s'oppose à la force mécanique appliquée à la production d'un travail électrique. Or une réaction de sens contraire à une force mécanique peut s'appeler une « contre-force » et d'un autre côté, quand on applique (par l'entremise d'une pile voltaïque, par exemple) une force électromotrice à la production d'un travail mécanique, on retrouve ici encore une réaction de sens contraire; cette réaction de sens contraire à une force électromotrice est une « force contre-électromotrice ».

Rien n'est plus facile que de démontrer expérimentalement l'existence de cette force contre-électromotrice. Il suffit d'avoir à sa

disposition un petit moteur¹, quelques éléments de pile de faible résistance intérieure et un galvanomètre. Les trois appareils étant reliés dans un même circuit, il suffit d'observer les déviations du galvanomètre quand on empêche le moteur de tourner et quand on le laisse fonctionner sous des charges plus ou moins grandes. Dans une expérience faite par l'auteur devant la Société des Arts, en Angleterre, un petit moteur de son invention fut relié à deux accumulateurs et à un galvanomètre spécial. Quand on calait l'arbre du moteur à l'immobilité complète, le galvanomètre marquait 44 degrés; quand on le laissait tourner, l'aiguille ne marquait plus que 23 degrés, et baissait graduellement, à mesure que sa vitesse augmentait, jusqu'à ne plus marquer que 15 degrés.

L'existence de cette force contre-électromotrice est de la plus haute importance en ce qui concerne le fonctionnement de la machine dynamo comme moteur, car de l'existence et de la grandeur de cette force contre-électromotrice dépend le degré d'utilisation, dans un moteur donné, de l'énergie électrique qui lui est fournie sous forme de courant électrique.

Dans l'étude de la dynamo comme génératrice, nous avons développé certaines considérations dont la mise en pratique a pour objet d'augmenter le rendement de ces génératrices. Il va de soi qu'une grande partie de ces considérations, telles que la suppression des résistances inutiles, des masses de fer dans les noyaux, etc., s'applique également aux moteurs ou réceptrices. Plus un moteur sera exempt de ces causes de pertes, meilleur sera son rendement.

Mais le rendement d'un moteur dans l'utilisation de l'énergie d'un courant ne dépend pas uniquement de son rendement propre; il dépend encore d'une autre considération, qui est la relation entre la force électromotrice qu'il développe en tournant et la force électromotrice — ou, comme on dit quelquefois, la pression électrique — à laquelle lui est fourni le courant.

Un moteur qui, par sa rotation, n'engendre lui-même qu'une faible force électromotrice ne peut pas, quelque bien conçu qu'il soit, être un moteur économique ou à *bon rendement* quand il est

1. Un moteur de type courant — Machine magnéto ou Dynamo montée en série.

alimenté par des courants de *grande* force électromotrice. Une bonne machine à vapeur à basse pression ne « rend » pas davantage quand on lui fournit de la vapeur à haute pression, pas plus qu'une machine à haute pression, si bien construite qu'elle soit, ne peut atteindre un bon rendement quand on lui fournit la vapeur à de basses pressions. Des considérations analogues s'appliquent aux dynamos envisagées comme moteurs. Ces machines doivent être alimentées par des courants de force électromotrice appropriée à leur construction. Même avec un moteur parfait — ne présentant ni frottements ni résistance d'aucune espèce — on n'arriverait pas à un « bon rendement » ou à un résultat économique, si l'on n'observait la loi ci-dessus pour les conditions dans lesquelles le courant électrique doit lui être fourni.

CHAPITRE XIX

THÉORIE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

On peut démontrer mathématiquement que la manière dont un moteur parfait utilise l'énergie électrique du courant dépend du rapport entre la force contre-électromotrice développée dans l'armature de ce moteur et la force électromotrice du courant fourni par la pile qui l'alimente. Il n'y a pas de moteur qui arrive à transformer en travail utile la totalité du courant qu'il reçoit, car il est impossible de construire des machines sans résistance, et, toutes les fois qu'une résistance est opposée à un courant, une partie de l'énergie de ce courant est dépensée à échauffer le fil résistant. Appelons W l'énergie électrique totale développée en une seconde par un courant, et w la portion de cette énergie que le moteur prélève sur le circuit en travail utile¹. Tout le reste de l'énergie du courant, ou $W - w$, sera dépensé en échauffement inutile des résistances.

Mais, si l'on veut faire fonctionner le moteur dans les meilleures conditions d'économie, il est clair qu'il faut réduire autant que possible cette dépense en chaleur, c'est-à-dire, en appliquant nos symboles, faire w autant que possible égal à W .

1. Il est bien entendu que ce symbole w s'applique à la valeur du travail emprunté par le moteur *en tant que mesuré électriquement*. Ce travail n'apparaîtra cependant pas en totalité sous forme d'effet utile mécanique; une partie en sera absorbée par les frottements mécaniques et une autre partie en production coûteuse de courants parasites dans les parties mobiles du moteur. La proportion dans laquelle w se manifeste sous forme de travail utile mécanique dépend du rendement *propre* du moteur, dont nous ne nous occupons pas ici. Dans tout ce qui va suivre, nous admettrons qu'il n'existe aucune cause de pertes de ce genre, c'est-à-dire que nous considérerons le moteur comme *parfait*.

On peut, comme nous venons de le dire, démontrer mathématiquement que le rapport entre l'énergie ainsi utilisée et l'énergie totale dépensée est égal au rapport de la force contre-électromotrice du moteur à la force électromotrice de la pile qui l'alimente. (Nous supposons que le moteur est un moteur magnéto-électrique, afin d'éviter de compliquer les considérations générales ici développées par l'introduction, dans l'expression du rendement, de l'énergie consommée sous forme de chaleur dans les bobines d'électroaimants du moteur.) Nous en donnerons plus loin la démonstration. — Appelons \mathcal{E} la force électromotrice totale sous laquelle la pile alimente le moteur, et E la force contre-électromotrice de ce dernier. La loi en question est exprimée par la relation suivante :

$$\frac{w}{W} = \frac{E}{\mathcal{E}}.$$

Mais nous pouvons aller plus loin. Si les résistances du circuit sont constantes, le courant i , observé quand le moteur est en mouvement, sera inférieur au courant I correspondant à l'état de repos du moteur. Or, d'après la loi d'Ohm, on sait que

$$i = \frac{\mathcal{E} - E}{R},$$

R étant la résistance totale du circuit; par suite,

$$\frac{I - i}{I} = \frac{E}{\mathcal{E}} = \frac{w}{W};$$

d'où il résulte qu'on peut calculer le rendement avec lequel fonctionne le moteur d'après le rapport entre la diminution d'intensité du courant et l'intensité primitive. Cette loi mathématique du rendement étant connue depuis vingt ans¹, il est étrange qu'elle ait été ignorée ou mal comprise même dans un grand nombre d'ouvrages des plus autorisés. On l'a généralement confondue avec une autre loi découverte par Jacobi, qui n'est nullement une loi de rendement, mais une loi de travail maximum dans un temps donné. Il n'est

1. La véritable loi du rendement a même été clairement établie par Thomson en 1851 et est reconnue dans un travail de Joule remontant à peu près à la même date. Voir également *Steam Engine* (La Machine à vapeur), de Rankine, p. 546.

pas rare en effet de trouver la loi d'Activité maxima de Jacobi énoncée comme loi du Rendement maximum. Cependant, comme expression mathématique, la véritable loi est implicitement contenue dans plus d'un des mémoires de Joule; elle est également comprise dans plusieurs passages des mémoires de Jacobi¹; elle existe dans la *Théorie mécanique de la Chaleur* de Verdet². Elle est restée néanmoins une pure abstraction mathématique jusqu'au jour où le D^r Siemens en a fait ressortir la véritable signification, il y a trois ou quatre ans.

La loi de Jacobi relative à l'activité maxima d'un moteur électrique, alimenté par des courants provenant d'une source de force électromotrice donnée, s'énonce de la manière suivante : *Le travail mécanique par seconde développé par un moteur est maximum quand*

1. Jacobi paraît avoir très clairement compris que sa loi était une loi d'activité maxima, mais n'avoir pas compris qu'elle n'était pas une loi de véritable rendement économique. — Dans un passage (*Annales de Chimie et de Physique*, t. XXXIV (1852), p. 480), il dit : — « Le travail mécanique maximum, ou plutôt l'effet économique, n'est nullement compliqué par ce que M. Müller appelle les circonstances spécifiques des moteurs électro-magnétiques. » — Cependant, bien qu'il y ait là une confusion apparente entre ces deux lois différentes, Jacobi, dans une partie antérieure du même mémoire (p. 466), dit : — « En divisant la quantité de travail par la dépense (de zinc), on obtient une expression très importante dans la mécanique industrielle : c'est l'effet économique, ou ce que les Anglais appellent *duty*. » Ici encore il y a une singulière confusion. La définition est parfaite; mais l'« effet économique » n'est pas la même chose que l'activité maxima. Ainsi que nous l'avons dit, la loi de Jacobi n'est pas une loi de rendement maximum, mais une loi d'activité maxima, et c'est là que gît l'erreur. — Ce singulier conflit d'idées n'est pas d'ailleurs le seul à relever dans ce mémoire; Jacobi y parle constamment du *travail* comme étant le produit d'une force par une vitesse, au lieu du produit d'une force par un déplacement. Cette même confusion — assez commune chez les écrivains du Continent — se rencontre dans les commentaires de la loi de Jacobi donnés dans la *Théorie mécanique de la Chaleur* de Verdet, dans le *Lehrbuch der Physik* de Müller, et même dans le *Galvanismus* de Wiedemann. Or le produit de la force par la vitesse n'est pas le travail, mais le travail divisé par le temps, c'est-à-dire le taux de débit d'énergie ou « l'activité ». Cette erreur étant des plus répandues, il importe de réagir contre elle pour l'empêcher de se propager davantage. — Jacobi commet une autre erreur curieuse dans le mémoire auquel nous faisons allusion ci-dessus (p. 463), en supposant que l'intensité du courant ne peut devenir = 0 que lorsque le moteur tourne à une *vitesse infinie*. Le courant est réduit à zéro, comme chacun sait, quand la force contre-électromotrice du moteur est égale à celle de l'alimentation extérieure; et cette dernière étant finie, la vitesse du moteur, si ses électro-aimants possèdent une aimantation indépendante, n'a pas besoin non plus d'être infinie. — Cette erreur qu'on rencontre également dans Verdet paraît avoir jeté ce dernier hors de la voie de la véritable loi du rendement, et l'avoir fait retomber sur la loi de Jacobi.

2. Voir VERDET, *Œuvres*, t. IX, p. 174, où l'auteur commet, cependant, l'erreur dans laquelle on est si souvent tombé, en admettant que le rendement maximum possible d'un moteur, fonctionnant avec une force électromotrice donnée, est de 50 p. 100, c'est-à-dire le même que lorsqu'il fonctionne dans ses conditions d'activité maxima.

ce moteur tourne à une vitesse telle que l'intensité du courant est réduite à la moitié de ce qu'elle serait si le moteur était maintenu au repos. Ce fait implique naturellement que la force contre-électromotrice du moteur est égale à la moitié de la force électromotrice fournie par la pile ou la génératrice. Dans ces conditions, la moitié seulement de l'énergie fournie par la source extérieure est utilisée; l'autre moitié est dépensée en chaleur dans le circuit. Si la loi de Jacobi était réellement la loi du rendement, aucun moteur, si parfait qu'il fût par lui-même, ne pourrait convertir en travail effectif plus de 50 p. 100 de l'énergie électrique qui lui est fournie. Mais le Docteur Siemens a démontré¹, il y a plusieurs années, qu'on peut pratiquement faire rendre à une dynamo beaucoup plus de 50 p. 100 de l'énergie du courant.

Il suffit à cet effet qu'on ne lui demande pas d'effectuer son travail aussi rapidement. Le Docteur Siemens, à qui revient l'honneur d'avoir montré le premier la véritable signification physique d'expressions mathématiques regardées avant lui comme de pures abstractions, a démontré, par le fait, que, si un moteur est utilisé de manière à ne pas effectuer son travail à son taux de débit maximum, c'est-à-dire de manière à effectuer beaucoup moins de travail par tour, tout en tournant à une plus grande vitesse, il aura un rendement de beaucoup supérieur; en d'autres termes, bien qu'il effectue moins de travail dans un temps donné, il y aura aussi moins d'énergie dépensée, et le rapport entre le travail utile développé et l'énergie dépensée sera plus voisin de l'unité que précédemment.

En voici la démonstration algébrique : — Soient \mathcal{E} la force électromotrice dans les conducteurs qui fournissent le courant au moteur quand celui-ci est au repos, et i l'intensité du courant qui passe à un moment quelconque; l'énergie électrique W dépensée dans l'unité de temps (exprimée en watts) sera donnée par l'équation —

$$W = \mathcal{E} i = \mathcal{E} \frac{\mathcal{E} - E}{R}. \quad [\text{XLVI.}]$$

Le moteur étant alors mis en mouvement, une partie de cette

1. Cette loi de Siemens a été très bien et très clairement exposée par le professeur W.-E. Ayrton, dans sa conférence sur *la Transmission électrique de l'énergie*, devant l'Association Britannique, à Sheffield, en 1879.

Énergie électrique est dépensée à produire du travail, et le reste se consomme en échauffement des fils du circuit. Nous avons déjà employé le symbole w pour expression du travail utile (par seconde) effectué par le moteur. Toute l'énergie qui n'est pas ainsi utilisée est consommée en échauffement des résistances. Représentons par le symbole H la chaleur développée en pure perte par seconde; sa valeur mécanique sera HJ , en désignant par J l'équivalent mécanique de la chaleur introduit par Joule. On aura alors évidemment :

$$W = w + HJ;$$

mais, d'après la loi de Joule, la perte en chaleur déterminée par le courant d'intensité i à travers une résistance R est représentée par l'équation

$$HJ = i^2 R.$$

En substituant cette valeur dans l'équation précédente, nous avons

$$W = w + i^2 R,$$

qui peut aussi s'écrire

$$w = W - i^2 R. \quad [\text{XLVII.}]$$

Mais, d'après l'équation [XLVI.] précédente, $W = \mathcal{E} i$; d'où

$$w = \mathcal{E} i - i^2 R, \quad [\text{XLVIII.}]$$

et, en remplaçant i par sa valeur $\frac{\mathcal{E} - E}{R}$, nous avons

$$w = \frac{(\mathcal{E} - E) \left\{ \mathcal{E} - (\mathcal{E} - E) \right\}}{R},$$

ou

$$w = E \frac{\mathcal{E} - E}{R}. \quad [\text{XLIX.}]$$

La comparaison des équations [XLIX.] et [XLVI.] conduit à la suivante :

$$\frac{w}{W} = \frac{E(\mathcal{E} - E)}{\mathcal{E}(\mathcal{E} - E)},$$

ou finalement :

$$\frac{w}{W} = \frac{E}{\mathcal{E}}. \quad [\text{L.}]$$

Telle est, en réalité, la loi mathématique du rendement, si longtemps méconnue, jusqu'au jour où le D^r Siemens en montra la signification. Il n'était que juste de lui donner son nom; elle est connue sous le nom de *Loi de Siemens*.

Le rapport $\frac{w}{W}$ étant la mesure du rendement du moteur, l'équation ci-dessus montre qu'on peut donner à ce rendement une valeur aussi voisine que l'on veut de l'unité, en faisant tourner le moteur à une vitesse telle que E soit très voisin de \mathcal{E} ; c'est la véritable loi du rendement d'un moteur parfait, alimenté par de l'énergie électrique, sous la condition d'une force électromotrice extérieure constante.

Revenons maintenant à l'équation [XLVIII.]

$$w = \mathcal{E} i - i^2 R.$$

Pour trouver la valeur de i donnant la valeur *maxima* de w (qui est le travail effectué par le moteur *dans l'unité de temps*), on n'a qu'à prendre le coefficient différentiel et à l'égaliser à zéro¹ :

$$\frac{dw}{di} = \mathcal{E} - 2iR = 0,$$

d'où l'on tire

$$i = \frac{1}{2} \frac{\mathcal{E}}{R}.$$

- 1. La démonstration peut en être faite sans calcul différentiel, quoique moins simplement, de la manière suivante : écrivons l'équation [XLVIII.] sous cette nouvelle forme :

$$i^2 R - \mathcal{E} i + w = 0.$$

En résolvant cette équation comme une équation ordinaire du second degré dans laquelle i est l'inconnue, nous avons

$$i = \frac{\mathcal{E} \pm \sqrt{\mathcal{E}^2 - 4Rw}}{2R}.$$

Pour en déduire la valeur de i qui correspond à la valeur maxima de w , il suffit de se rappeler qu'une quantité négative ne peut avoir de racine carrée, et que, par suite, la plus grande valeur possible de w sera déterminée par la condition

$$4Rw = \mathcal{E}^2,$$

car alors le terme sous le radical s'annulera. Cette condition étant remplie, on en tire pour la valeur de i

$$i = \frac{\mathcal{E}}{2R},$$

c'est-à-dire que i sera réduit à la moitié de sa valeur primitive.

Mais, d'après la loi d'Ohm, $\frac{\mathcal{E}}{R}$ est la valeur du courant quand le moteur est au repos. On voit immédiatement par là que, pour fournir son travail maximum par seconde, le moteur doit tourner à une vitesse telle que le courant soit réduit à la moitié de la valeur qu'il aurait s'il était au repos. En réalité, nous démontrons ici la loi de Jacobi relative au taux maximum de débit d'énergie. Mais du moment où

$$i = \frac{\mathcal{E} - E}{R} = \frac{1}{2} \frac{\mathcal{E}}{R},$$

on a, comme conséquence,

$$\mathcal{E} - E = \frac{1}{2} \mathcal{E},$$

ou

$$\frac{E}{\mathcal{E}} = \frac{1}{2},$$

d'où il résulte également

$$\frac{w}{W} = \frac{1}{2},$$

c'est-à-dire que le rendement n'est que de 50 p. 100 quand le moteur fonctionne dans les conditions de travail maximum par seconde ou qu'il effectue son travail au taux de débit maximum ¹.

1. Il n'est pas sans intérêt de rappeler ici le cas tout à fait analogue qui se présente dans le calcul des courants fournis par une pile voltaïque. Tout le monde connaît la règle qui préside au groupement d'une pile composée d'un nombre d'éléments donné; chacun sait qu'elle fournit son courant maximum à travers une résistance extérieure donnée quand ses éléments sont groupés de telle façon que la résistance intérieure de la pile soit aussi voisine que possible de la résistance extérieure. Mais cette règle, qui est vraie pour le courant maximum (et, par suite, pour le taux maximum de consommation des zincs d'une pile), n'est pas applicable quand on cherche le groupement le plus économique; car, si la résistance extérieure et la résistance intérieure sont égales, la moitié de l'énergie du courant est dépensée à échauffer les éléments, et la moitié seulement en est utilisable dans le circuit extérieur. Si l'on cherche à réaliser la plus grande économie, il faut grouper les éléments de manière à avoir une résistance intérieure bien inférieure à la résistance extérieure. On n'aura pas, il est vrai, un courant aussi intense, et les zincs se consumeront plus lentement; mais on utilisera une proportion beaucoup plus considérable de l'énergie, et il s'en dépensera relativement beaucoup moins en échauffement des éléments de la pile. L'économie maxima correspondra naturellement à une résistance extérieure infiniment grande relativement à la résistance intérieure. L'énergie totale du courant sera alors utilisée dans le circuit extérieur, et il n'en sera pas inutilement dépensé dans la pile; mais il faudra un temps infiniment long pour obtenir, dans ce cas extrême, une quantité déterminée de travail. Le même mode de raisonnement s'applique exactement aux machines dynamos employées

Plusieurs représentations graphiques ont été imaginées pour rendre ces faits sensibles à l'œil ; l'une d'elles permet, par un seul diagramme, de démontrer graphiquement à la fois la loi du taux maximum de débit d'énergie de Jacobi, et la loi du rendement de Siemens¹.

Représentons par AB , figure 207, la force électromotrice \mathcal{E} , sous laquelle est fourni le courant. Sur AB construisons un carré $ABCD$ et menons la diagonale BD . Mesurons maintenant, à partir du point B , le long de la ligne AB , la force contre-électromotrice E du moteur. La longueur de cette portion de ligne augmentera avec la vitesse du moteur. Admettons que E atteigne la valeur BF . Cherchons quelles seront l'intensité du courant et l'énergie correspondantes, ainsi que le travail par seconde effectué par le moteur. Complétons d'abord la construction de la manière suivante :

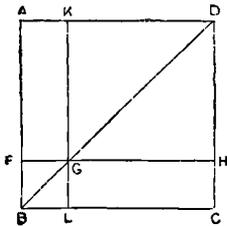


FIG. 207.

Par le point F , menons FGH parallèle à BC , et, par le point G , KL parallèle à AB . Alors, la force électromotrice employée dans le circuit à la production du courant est $\mathcal{E} - E$, que l'on peut représenter par l'une des lignes AF , KG , GH ou LC . Or, l'énergie électrique dépensée par seconde est $\mathcal{E}i$, et, puisque $i = \frac{\mathcal{E} - E}{R}$,

$$\mathcal{E} \frac{\mathcal{E} - E}{R},$$

et le travail par seconde absorbé par le moteur est, *en mesures électriques*,

$$E \frac{\mathcal{E} - E}{R}.$$

R étant constant, on peut comparer entre elles ces deux valeurs sous la forme

$$\mathcal{E}(\mathcal{E} - E)$$

et

$$E(\mathcal{E} - E).$$

comme génératrices, la résistance de la partie mobile du circuit correspondant à la résistance intérieure des éléments de pile. La condition de bonne économie exige que la résistance de l'induit soit très faible en comparaison de celle du circuit extérieur.

1. Voir le Mémoire de l'auteur dans le *Philosophical Magazine*, février 1883.

Or, la surface du rectangle

$$A F H D = \mathcal{E} (\mathcal{E} - E),$$

et celle du rectangle

$$G L C H = E (\mathcal{E} - E).$$

Le rapport de ces deux surfaces sur le diagramme est le rendement d'un moteur parfait, dans la condition d'alimentation électrique sous une force électromotrice constante donnée.

Considérons la figure 208, dans laquelle ces deux surfaces sont ombrées. Cette figure représente un cas où le moteur est trop chargé et ne peut tourner que très lentement, de telle sorte que la force contre-électromotrice E est très petite comparativement à \mathcal{E} . Ici, la surface qui représente l'énergie dépensée est très grande, tandis que celle représentant le travail utile effectué par le moteur est très petite. Le rendement est naturellement très faible. Les deux tiers, et même plus, de l'énergie sont consommés en chaleur.

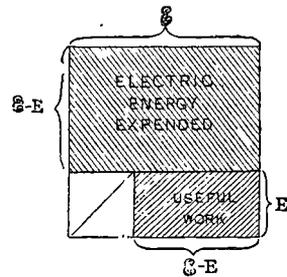


Fig. 208.

ELECTRIC ENERGY EXPENDED
= Énergie électrique dépensée.
USEFUL WORK = Travail utile.

Nous avons admis jusqu'ici que le rendement d'un moteur (fonctionnant sous force électromotrice extérieure constante) pouvait se mesurer électriquement. Mais il n'existe pas de moteur qui transforme réellement en effet mécanique utile la totalité de l'énergie électrique qu'il absorbe, une partie de cette énergie étant consommée en frottements, une autre en réactions électro-magnétiques coûteuses entre les parties fixes et mobiles du moteur. Cependant, si nous considérons le moteur comme une machine parfaite (dépourvue de frottements, exempte de courants parasites nuisibles, tournant sans trépidations, ne donnant pas d'étincelles aux balais-collecteurs, etc.), et susceptible de convertir en effet mécanique 100 pour 100 de l'énergie électrique qu'elle absorbe, alors, et alors seulement, nous pourrons prendre la mesure électrique du travail du moteur comme la véritable mesure de ce qu'il peut donner. Un appareil électrique « parfait » de ce genre serait, comme l'appareil thermique idéal « parfait » de Carnot, absolument réversible. Dans

L'appareil thermique de Carnot on suppose que la totalité de la chaleur réellement absorbée dans le cycle d'opérations est convertie en travail utile; et dans ce cas le rendement est le rapport de la chaleur absorbée à la chaleur totale dépensée. Ce rendement de l'appareil thermique parfait peut, comme on le sait, être exprimé en fonction de deux températures absolues, savoir : celle de la source chaude et celle de la source froide de l'appareil. L'appareil de Carnot est ainsi réversible idéalement; c'est-à-dire capable de reconvertir en chaleur le travail mécanique.

La loi mathématique du rendement d'une machine électrique parfaite représentée par la construction précédente est également un cas idéal. Et le rendement peut aussi être exprimé, étant données les constantes afférentes à un cas spécial, comme une fonction de deux forces électromotrices. Nous reviendrons un peu plus loin sur cette comparaison.

Loi d'Activité maxima (Jacobi).

Considérons maintenant la surface GLCII du diagramme figure 207, qui représente le travail utilisé dans le moteur. L'aire de cette

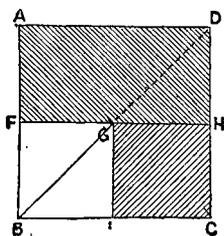


FIG. 209. — Illustration géométrique de la loi de Jacobi d'Activité maxima.

surface variera avec la position du point G et sera maxima quand G sera équidistant de B et de D; car, de tous les rectangles qu'on peut inscrire dans le triangle BCD, le carré est celui qui a la plus grande surface (fig. 209).

Mais si G est équidistant de B et D, le rectangle GLCII aura une surface exactement égale à la moitié de celle du rectangle AFID; c'est-à-dire que le travail utile sera égal à la moitié de l'énergie dépensée. Quand il en est ainsi, la force contre-électromotrice réduit le courant à la moitié de l'intensité qu'il aurait si le moteur était au repos; c'est l'expression de la loi de Jacobi relative au rendement d'un moteur effectuant son travail dans les conditions de débit maximum d'énergie. F sera alors aussi équidistant de B et de A, ce qui montre que

$$E = \frac{1}{2} \mathcal{E}.$$

Loi du Rendement maximum (Siemens).

Considérons, au contraire, ces deux rectangles quand le point G s'approche indéfiniment de D (fig. 210). Nous savons par la géométrie ordinaire que le rectangle GLCH est égal au rectangle AFGK. La surface du carré KGHD, qui est l'excédent de AFHD sur AFGK, doit, par suite, représenter la portion d'énergie électrique consommée à échauffer les résistances du moteur. Pour que le rendement soit maximum, la dépense en chaleur doit être minima.

Dans la figure 208, ce coin carré, qui représente la perte en chaleur, était énorme. Dans la figure 209, il correspondait exactement à la moitié de l'énergie dépensée. Dans la figure 210, il n'en est guère qu'un huitième. On peut évidemment rendre la perte en chaleur aussi petite que l'on veut; il suffit de choisir le point F très voisin de A. Le rendement sera maximum quand la perte en chaleur sera minima. Le rapport des surfaces GLCH et AFHD, qui représente le rendement, ne peut donc devenir égal à l'unité que quand le carré KGHD devient infiniment petit, — c'est-à-dire quand le moteur tourne assez vite pour que sa force contre-électromotrice E ne diffère de \mathcal{E} que d'une quantité infiniment petite.

Il est clair, d'ailleurs, que si le diagramme doit représenter un rendement quelconque donné — 90 pour 100 par exemple — le point G doit être choisi de telle sorte que la surface GLCH = 9 dixièmes de la surface AFHD; ou bien encore G doit être pris aux 9 dixièmes, à partir de B, de la longueur totale BD. Ceci implique que E doit être égal aux 9 dixièmes de \mathcal{E} , ou que le moteur doit tourner à une vitesse qui réduise le courant au dixième de ce qu'il serait si le moteur était au repos. Ainsi se vérifie géométriquement la loi du rendement du Docteur Siemens.

D'ailleurs, si le moteur n'est pas un moteur « parfait », mais un moteur dont le rendement intrinsèque, ou *rendement propre*, soit connu, on peut représenter sur le diagramme le travail mécanique

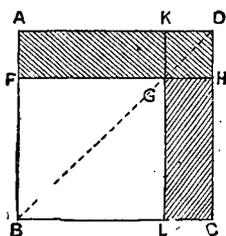


FIG. 210. — Illustration géométrique de la loi de Siemens sur le Rendement maximum.

réel effectué par le moteur en retranchant simplement du rectangle GLCH la fraction d'énergie perdue en frottements, etc. De même, dans le cas où l'énergie électrique dépensée a été engendrée dans une machine dynamo-électrique dont le rendement intrinsèque est connu, le travail mécanique total dépensé peut être représenté par addition à la surface AFHD de la proportion consommée en frottements inutiles, etc. Pour rendre le diagramme encore plus expressif, on peut diviser la surface KGHJ en bandes proportionnelles aux diverses résistances du circuit; les surfaces de ces différentes bandes représenteront alors la chaleur développée en pure

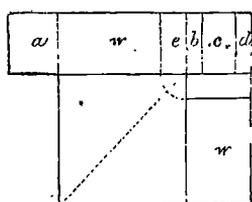


FIG. 211.

perte dans les parties respectives du circuit. Ces conditions sont réalisées à titre d'exemple dans la figure 211, qui représente un transport de force entre deux dynamos ayant chacune un rendement propre supposé de 80 pour 100, et une résistance de 500 ohms, à travers une ligne d'une résistance égale à 1000 ohms, la force élec-

tromotrice de la machine employée comme génératrice étant de 2400 volts, et celle de la machine servant de réceptrice de 1600 volts.

La surface supérieure entière représente l'énergie mécanique totale consommée. Désignons-la par 100. Elle est dépensée de la manière suivante : $a = 20$, perte en frottements, etc., dans la génératrice ; $b = 6\frac{2}{3}$, perte en chaleur dans la génératrice ; $c = 13\frac{1}{3}$, perte en chaleur dans la ligne ; $d = 6\frac{2}{3}$, perte en chaleur dans la réceptrice ; $e = 10\frac{2}{3}$, perte en frottements dans la réceptrice ; $w = 42\frac{2}{3}$ est le quantum recueilli en travail mécanique utile.

Il ne nous reste plus qu'à faire ressortir un singulier contraste qui se présente entre le rendement d'une Machine Thermique parfaite et celui d'une Machine Électrique parfaite. Nous avons vu que l'un pouvait être exprimé en fonction de deux températures, et l'autre en fonction de deux forces électromotrices. Mais dans la machine thermique le rendement est maximum quand la différence entre les deux températures est maxima ; tandis que dans la machine électrique le rendement est maximum quand la différence

entre les deux forces électromotrices est minima. Ces deux cas sont mis en opposition dans les figures 212 et 213 ci-dessous. La figure 212 montre le rendement d'une Machine Thermique fonctionnant entre les températures T et t (cómptées à partir du zéro absolu) ; tandis que la figure 213 montre le rendement d'une Machine Électrique recevant un courant sous une force électromotrice \mathcal{E} , sa force contre-électromotrice étant E . La remarque de Joule, ici illustrée, qu'il est beaucoup plus facile de donner un bon rendement à une machine électrique qu'à une machine à vapeur quelconque, est amplement confirmée par l'expérience ; mais en dépit de ce fait les machines électriques sont encore plus coûteuses en pratique que

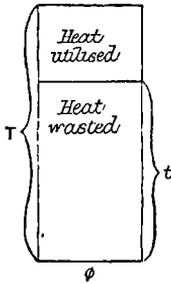


FIG. 212.

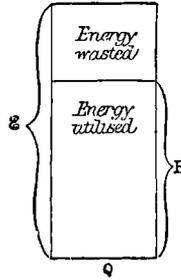


FIG. 213.

Contraste entre la Machine Thermique et la Machine Électrique.

Heat utilised = Chaleur utilisée.
Heat wasted = Chaleur dépensée.

Energy wasted = Énergie dépensée.
Energy utilised = Énergie utilisée.

les machines thermiques, et cela uniquement en raison de ce que l'énergie sous forme de courants électriques fournis à haut potentiel est encore d'un prix beaucoup plus élevé comme production que l'énergie sous forme de chaleur fournie à une température élevée.

Transport électrique de l'Énergie.

Dans toute la discussion précédente, nous avons supposé que le moteur devait fonctionner sous l'action d'un courant fourni *sous une force électromotrice constante*. Il n'est pas seulement commode, mais sage et utile de baser l'argumentation sur cette condition, qui est probablement celle qui, dans un avenir peu éloigné, s'imposera

à la distribution de la puissance électrique dans les villes. Il serait absurde, dans l'état actuel de la science électrotechnique, de s'occuper d'une question telle que la construction et l'utilisation des moteurs, sans tenir compte des conditions pratiques dans lesquelles ils devront être employés. La condition de force électromotrice constante et déterminée n'est pas, cependant, le seul mode possible d'alimentation du moteur; car, ainsi que nous l'avons vu antérieurement, on peut faire fonctionner une machine génératrice ou un système de machines génératrices de manière à en obtenir un courant constant.

Mais le mode de distribution par courant constant est, quand il s'agit de transports de force à grandes distances, un procédé beaucoup plus économique que le mode de distribution sous potentiel constant, en raison de ce fait que le premier mode de distribution permet d'employer des fils conducteurs plus fins, et par suite moins coûteux. Dans la discussion ultérieure de la théorie relative aux différents enroulements des moteurs, nous aurons, en conséquence, à tenir compte de ces deux cas. En attendant, nous discuterons deux problèmes qui se réfèrent à la transmission de la force par moteurs électriques, problèmes capitaux en ce qui concerne l'intelligence des conditions que doivent remplir ces moteurs.

Il s'agit de déterminer la relation entre le potentiel sous lequel le courant est fourni au moteur et la perte sous forme de chaleur dans le circuit.

Soit ΣR la somme de toutes les résistances dans le circuit; on a alors, d'après la loi de Joule, pour expression de la perte en chaleur (en mesures mécaniques)

$$HJ = i^2 \Sigma R;$$

et, puisque $i = \frac{\mathcal{E} - E}{\Sigma R}$, nous pouvons écrire cette perte en chaleur sous la forme suivante :

$$HJ = \frac{(\mathcal{E} - E)^2}{\Sigma R}.$$

Supposons maintenant que, sans changer les résistances du circuit, nous puissions augmenter \mathcal{E} ainsi que E , tout en conser-

vant à $\mathcal{E} - E$ la même valeur que précédemment; il est clair que la perte en chaleur sera exactement la même qu'auparavant. Mais qu'arrivera-t-il du travail? — Soient \mathcal{E}' et E' les deux nouvelles valeurs respectives de \mathcal{E} et de E ; l'énergie électrique dépensée par seconde sera alors

$$W' = \frac{\mathcal{E}' (\mathcal{E}' - E')}{\Sigma R},$$

et le travail utile ainsi effectué

$$w' = \frac{E' (\mathcal{E}' - E')}{\Sigma R},$$

c'est-à-dire que, sans perte plus grande sous forme de chaleur, il sera transmis plus d'énergie et il sera effectué plus de travail. Le rendement sera ainsi plus élevé, car

$$\frac{w'}{W'} = \frac{E'}{\mathcal{E}'},$$

et ce rapport est plus voisin de l'unité que $\frac{E}{\mathcal{E}}$, puisque \mathcal{E} et E ont subi tous deux un accroissement arithmétiquement égal. Il résulte clairement de là qu'il est économique de faire fonctionner le moteur à force électromotrice élevée. L'importance de cette question, mise en relief en premier lieu par le Docteur Siemens et postérieurement par M. Marcel Deprez, ne saurait être portée trop haut. — Mais comment obtenir cette force électromotrice élevée? — Un procédé très simple consiste à faire tourner la génératrice et le moteur à des vitesses plus considérables. Il y a un autre moyen, c'est de mettre sur les induits de nombreuses spires de fil faisant un grand nombre de tours. Mais ce dernier procédé a l'inconvénient d'introduire dans le circuit des résistances considérables. Cet inconvénient peut cependant ne pas être bien grave si le circuit a déjà par lui-même une haute résistance, telle qu'un grand nombre de kilomètres de fil à travers lesquels la force doit être transmise. Dans ce cas, on ne double pas la résistance en doublant la force électromotrice. Mais, même dans le cas où la résistance de la ligne est insignifiante, il y a encore économie à augmenter la force électromotrice; car, ainsi qu'on peut le déduire des équations ci-dessus, $\mathcal{E} - E'$ étant maintenu constant,

doubler la force électromotrice revient à doubler le rendement, si la résistance de la ligne est très faible comparativement à celle des machines, et à le quadrupler si la résistance de la ligne est très considérable relativement à celle des machines. Par le fait, le surcroît de résistance, qu'on ne peut éviter, vaut bien la peine d'être accepté si l'on réussit à assurer une force électromotrice élevée par l'emploi de bobines en fil fin d'un grand nombre de spires. L'effet utile diminue, il est vrai, toutes choses égales d'ailleurs, à mesure

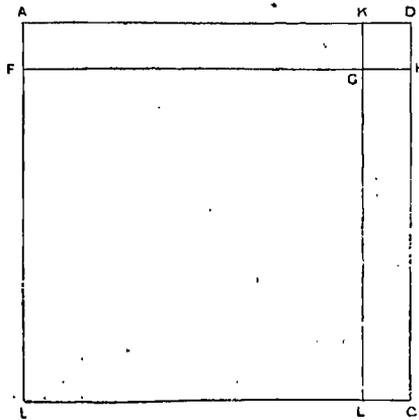


FIG. 214.

que la résistance augmente; mais ce résultat est plus que contrebalancé par le fait que ce même effet utile croît comme le carré de la force électromotrice.

L'avantage résultant, dans le cas du transport électrique de l'énergie, de l'emploi de forces électromotrices très élevées dans les deux machines peut également se déduire du diagramme.

Supposons que, dans la figure 207 ci-dessus, on ait représenté le cas où \mathcal{E} est égal à 100 volts et E à 80 volts. Admettons maintenant que les résistances du circuit restent les mêmes, tandis qu'on porte \mathcal{E} à 200 volts et E à 180 volts. (On peut y arriver en augmentant la vitesse des deux machines dans la proportion voulue.) $\mathcal{E} - E$ est toujours égal à 20 volts, et le courant est le même que précédemment. La figure 214 met en évidence ce nouvel état de choses. Le carré $KGH D$, qui représente la perte en chaleur, a la même surface que précédemment; mais l'énergie dépensée est deux fois

aussi considérable, et le travail utile effectué est plus de deux fois aussi élevé. Une force électromotrice élevée est donc synonyme non seulement d'une plus grande quantité de force transmise, mais aussi d'un rendement de transport plus élevé. Le rendement du système était, dans le cas de la figure 207, de 80 p. 100; dans le cas de la figure 214 il est de 90 p. 100 (les machines employées étant supposées « parfaites »); et, tandis que l'énergie dépensée a doublé, la restitution utile s'est élevée dans le rapport de 9 à 4.

Dans sa tentative récente de réaliser ces conditions par un transport de force entre Miesbach et Munich en 1882, sur une ligne double de fil télégraphique, à une distance de cinquante-cinq kilomètres, M. Marcel Deprez a fait usage de forces électromotrices très élevées. Les machines étaient deux dynamos Gramme ordinaires, à électro-aimants en série, semblables entre elles; mais leur faible résistance habituelle avait été modifiée par l'emploi de bobines formées d'un grand nombre de tours de fil fin. La résistance de chacune des machines était, par suite, de 470 ohms, tandis que celle de la ligne était de 950 ohms¹. La génératrice tournait à une vitesse de 2 100 tours par minute, et le moteur à 1 400 tours. La différence de potentiel aux bornes de la génératrice était de 2 400 volts; et celle aux bornes de la réceptrice, de 1 600 volts.

D'après M. le professeur von Beetz, président de l'Exposition de Munich, où l'expérience a été faite, le rendement mécanique a été trouvé égal à 32 p. 100. M. Deprez a énoncé la règle que le rendement $\frac{w}{W}$ s'obtient, dans le cas où l'on emploie deux machines identiques, par la comparaison de leurs vitesses aux deux points extrêmes, ou que

$$\frac{w}{W} = \frac{n}{N},$$

N étant la vitesse de la génératrice, et n celle de la réceptrice. On peut cependant faire à cette formule l'objection que les forces électromotrices ne sont proportionnelles aux vitesses qu'autant que les

1. Ces chiffres et ceux qui suivent sont ceux fournis par M. le Professeur von Beetz, président de l'Exposition de Munich, à l'autorité duquel ils empruntent leur crédit.

champs magnétiques des deux machines ont la même intensité et que le même courant circule dans les deux machines. Tel n'est pas le cas lorsqu'il y a des pertes le long de la ligne. De plus, dans le cas d'une ligne ayant une grande résistance, le rapport des forces électromotrices des deux machines n'est pas le même que le rapport des différences de potentiels mesurées aux bornes de ces machines.

En outre, même avec un courant absolument identique traversant les armatures et les électro-aimants de la génératrice qui produit le courant et de la réceptrice qui l'utilise, et pour deux machines de construction tout à fait pareille, les intensités des champs magnétiques des deux machines ne sont pas égales; la réaction entre l'inducteur et l'induit est, en effet, totalement différente dans la dynamo employée comme réceptrice et dans celle employée comme génératrice. Nous examinons plus loin ces réactions.

M. G. Cabanellas a donné récemment sous la forme suivante une expression pour le rendement d'un système de transport électrique d'énergie. En prenant F comme symbole général de la *fraction* qui représente le coefficient économique et employant les suffixes T, G, L et M pour spécifier les mots *Transmission, Génératrice, Ligne* et *Moteur* ou *réceptrice*, respectivement, on a

$$F_T = F_G \times F_L \times F_M.$$

Mais si l'on représente par les lettres E et e les forces électromotrices de la génératrice et de la réceptrice, et par R et r leurs résistances intérieures respectives; et si l'on appelle ε la différence de potentiel à l'extrémité génératrice de la ligne et ρ la résistance de celle-ci, on a

$$F_G = \frac{Ei - Ri^2}{Ei};$$

$$F_L = \frac{\varepsilon i - \rho i^2}{\varepsilon i};$$

$$F_M = \frac{ei}{ei + ri^2}.$$

Si l'on pose alors, pour abrégé,

$$\frac{E i}{R i^2} = m;$$

$$\frac{e i}{r i^2} = m';$$

$$\frac{\varepsilon i}{\rho i^2} = m'';$$

il vient

$$F_T = \frac{m-1}{m} \times \frac{m'}{m'+1} \times \frac{m''-1}{m''}.$$

Cette forme réduit l'expression totale du rendement du système de transmission à la considération de trois quantités distinctes, de la forme $m = \frac{E}{R i}$, que M. Cabanellas appelle les *déterminantes* des trois parties considérées.

Le second problème relatif au transport électrique de l'énergie est le suivant :

Supposons qu'on désire faire fonctionner un moteur de manière à effectuer un travail à raison d'un certain nombre de chevaux-vapeur déterminé, et que le fil disponible pour transporter le courant ne puisse pas supporter plus d'un certain nombre d'ampères, sans danger de s'échauffer outre mesure. Il peut être nécessaire de connaître la force électromotrice qu'un moteur donné sera capable de restituer et la force électromotrice primaire qui devra lui être fournie à l'extrémité du fil. Soient P le nombre de chevaux-vapeur à transmettre, et i l'intensité maxima de courant (en ampères) que peut supporter le fil. Dès lors, d'après la formule connue de la puissance d'un courant, on a

$$\frac{E i}{736} = P,$$

d'où

$$E = \frac{736 P}{i},$$

pour expression de la condition relative à la force électromotrice

(en volts) que la machine doit être capable de fournir, en tournant à sa vitesse normale de fonctionnement comme moteur. D'ailleurs, la force électromotrice primaire ε doit être telle que

$$\frac{\varepsilon - E}{\Sigma R} = i,$$

ΣR étant la somme de toutes les résistances dans le circuit. On en tire

$$\varepsilon = E + i \Sigma R,$$

qui est la condition demandée.

CHAPITRE XX

RÉACTION ENTRE LES INDUCTEURS ET L'INDUIT DANS UNE MACHINE RÉCEPTRICE

Nous avons examiné dans le Chapitre V (pp. 73 à 87), les réactions entre les inducteurs et l'induit d'une machine dynamo, mais nous avons limité notre étude à ce qui se passe quand la machine est employée comme génératrice. Dans ce cas le courant induit dans les bobines d'armature tendait, ainsi que nous l'avons vu, à aimanter l'âme de l'armature dans une direction à peu près normale à celle de l'aimantation fournie par les électro-aimants eux-mêmes; d'où une aimantation résultante sous un angle oblique. Cette obliquité obligeait à donner au calage des balais une certaine avance dans le sens du mouvement; et ce calage en avance avait pour conséquence nécessaire de donner à la polarité du courant d'armature une tendance à désaimanter partiellement les électro-aimants. En se reportant à la figure 64 (p. 78), on verra que, aux points quelconques où sont placés les balais, il y a tendance à la formation de pôles correspondants, et que ces pôles d'armature tendent à déterminer dans les pièces polaires en fer des électro-aimants une polarité opposée à la leur, et par suite à affaiblir le champ magnétique.

Dans un moteur ou une machine réceptrice il n'en est plus de même. Le courant fourni par une source extérieure aimante l'armature et la transforme en un puissant aimant, dont les pôles seraient, comme dans la génératrice, sensiblement à angles droits avec la ligne qui joint les pièces polaires, s'il n'y avait pas, dans ce cas également, une certaine inclinaison de calage à donner aux

balais. Supposons, comme dans toutes les figures de cet ouvrage, que le pôle S. des électro-aimants soit à gauche, et le pôle N. à droite. Supposons de même que le courant circule dans l'armature de manière à déterminer un pôle S. au point le plus élevé et un pôle N. au point le plus bas. Dans ce cas évidemment l'armature va tourner vers la droite, si l'on considère le point le plus haut, c'est-à-dire dans le sens des aiguilles d'une montre, attendu que le pôle S. au sommet sera repoussé par le pôle S. situé à sa gauche et attiré vers le pôle N. qui est à droite. Un résultat beaucoup plus

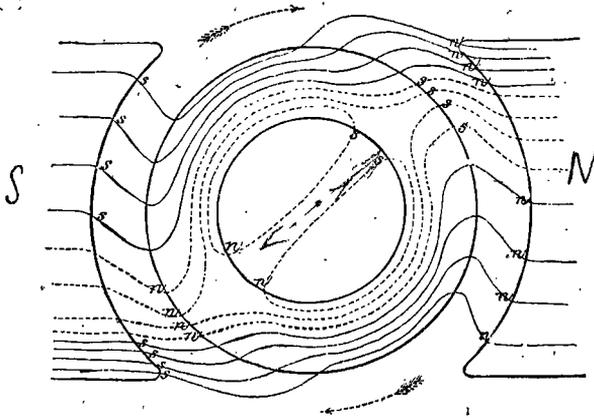


FIG. 215. — Réactions magnétiques entre les Inducteurs et l'Induit d'une Machine Réceptrice.

important encore se manifestera dans l'attraction mutuelle de ces deux polarités. Le pôle N. à droite tendra à induire un pôle S. dans la portion de l'armature dont il sera le plus voisin; et il y aura production d'un énergique pôle S. résultant dans une position oblique, à droite du point le plus élevé. La figure 215 indique la marche des lignes de force dans le champ mutuel; elle montre également comment le magnétisme de l'armature réagit sur les électro-aimants, ajoutant à leurs lignes de force (celles indiquées en pointillé sont supposées dues à l'armature) et modifiant leur champ magnétique. Deux conséquences en résultent immédiatement. Le calage à donner aux balais doit être un calage *en avance*¹, si l'on veut profiter de l'avantage résultant du renfor-

1. C'est-à-dire que, dans la réceptrice comme dans la génératrice, les balais sont légè-

cement mutuel des deux forces magnétiques. Du moment où la polarité de l'armature renforce celle des inducteurs, on peut même faire fonctionner un moteur sans recourir à aucun autre mode d'aimantation des électro-aimants; l'armature induisant un pôle dans les électro-aimants se mettra en mouvement en vertu de sa propre attraction vers ce pôle induit. Ce principe a été mis en œuvre depuis de longues années dans de petits moteurs; il paraît avoir été appliqué pour la première fois par Wheatstone.

Il y a lieu de comparer attentivement les figures 64 et 215, qui représentent les champs magnétiques respectifs d'une génératrice et d'une réceptrice. Dans l'une, l'armature est entraînée mécaniquement contre les forces magnétiques du champ qui tendent à la ramener en arrière; dans l'autre, les forces magnétiques du champ tendent à la faire tourner, ce qui la rend apte à produire un travail mécanique. Dans un cas, il y a une réaction mécanique inverse qui tend à arrêter la machine à vapeur; dans l'autre, il se développe une réaction électrique inverse (la force contre-électromotrice induite) qui tend à arrêter le courant¹. Dans les deux cas, on suppose que le mouvement a lieu dans le même sens — celui des aiguilles d'une montre. Dans l'un comme dans l'autre, l'effet résultant est un déplacement des lignes de force du champ; mais dans la génératrice le mouvement mécanique agit comme s'il entraînait le magnétisme avec lui, tandis que dans la réceptrice les réactions magnétiques réciproques agissent comme si leur effort pour entraîner circulairement le magnétisme de l'armature n'aboutissait qu'à produire une rotation mécanique. Dans les deux cas, on donne aux balais un calage en avance. Dans la dynamo considérée comme génératrice, nous avons trouvé que

rement déplacés *dans le sens du mouvement*. Ce fait est connu depuis des années; cependant, grâce probablement à une certaine confusion de langage dans l'emploi des expressions de calage positif et de calage négatif, on a posé en principe, en s'appuyant sur une haute autorité, que le calage en retard ou en arrière devait être considéré comme la véritable condition pour une réceptrice.

1. La loi de la réaction électrique résultant, pour une génératrice, du mouvement mécanique est résumée dans la loi bien connue de Lenz, que *le courant induit est toujours tel qu'en vertu de son action électro-magnétique il tend à s'opposer au mouvement qui lui donne naissance*. Dans le cas inverse de la réaction mécanique résultant, pour un moteur, d'une alimentation en énergie électrique, il est aisé de formuler une loi inverse en ces termes : *le mouvement produit est toujours tel qu'en vertu des inductions magnéto-électriques qu'il développe il tend à s'opposer au courant.*

la self-induction dans l'armature avait pour effet d'augmenter l'angle de calage; dans la réceptrice, au contraire, la self-induction a pour effet de diminuer cet angle de calage. Si les balais d'un moteur sont calés sur la ligne neutre, et si l'armature est très puissante comparativement aux électro-aimants, ce moteur tournera indifféremment dans un sens ou dans l'autre, selon l'impulsion qui lui sera donnée au départ. Si l'on renverse le courant dans la *portion-armature* seulement du circuit, le moteur changera généralement de sens de rotation; mais il faudra aussi changer le sens de calage de ses balais, si l'on veut qu'il tourne à la même vitesse que précédemment. Si, au lieu de renverser le courant dans l'armature, on renverse l'aimantation des électro-aimants, on arrivera au même résultat. Si l'on opère les deux inversions simultanément, le moteur continuera à tourner comme si rien n'avait été modifié.

Les dynamos enroulées et montées pour fonctionner comme génératrices de courants continus peuvent être dans tous les cas employées comme réceptrices ou moteurs, mais avec une légère différence. Une dynamo en série montée en génératrice et tournant dans le sens des aiguilles d'une montre (ses balais calés par suite en avance sur la droite) tournera, quand elle sera alimentée par un courant provenant d'une source étrangère, comme réceptrice, mais en sens inverse, c'est-à-dire à contre-balais. Pour la monter convenablement en réceptrice, il faut *ou* renverser les connexions de l'armature, *ou* renverser celles des électro-aimants (dans les deux cas, elle tournera alors dans le sens des aiguilles d'une montre), *ou bien* encore renverser les balais et les caler en sens inverse (auquel cas elle tournera en sens inverse).

Une dynamo en dérivation montée pour fonctionner en génératrice prendra, comme réceptrice, quand elle sera alimentée par un courant extérieur, un mouvement de même sens que dans sa condition précédente. En effet, si le courant dans la *portion-armature* est de même sens que précédemment, celui qui circule dans la dérivation est de sens contraire, et *vice versa*.

Une dynamo compound, à double enroulement, montée pour fonctionner comme génératrice, tournera comme réceptrice en sens inverse, à contre-balais; si la *portion-électro-aimants* montée en

série est plus puissante que la portion montée en dérivation, et dans le sens de ses balais, si le courant qui passe dans la dérivation est prépondérant. Si les connexions sont telles (comme dans les dynamos à double enroulement) que les électro-aimants subissent la somme des effets des bobines en série et en dérivation quand la machine est employée comme génératrice, ils recevront la différence de ces deux effets quand elle fonctionnera comme réceptrice. L'emploi d'un moteur à enroulement différentiel présente certains avantages, comme nous le verrons plus loin.

CHAPITRE XXI

TYPES SPÉCIAUX DE MOTEURS

Nous avons décrit, au commencement de cette section, les premières formes typiques de moteurs. La plupart des dynamos

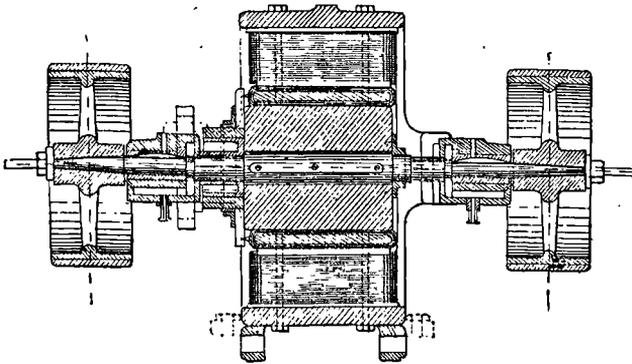


FIG. 216. — Moteur Gramme à 4 pôles (coupe).

décrites au Chapitre VII ci-dessus, celles de Gramme et de Siemens par exemple, s'emploient aussi bien comme moteurs; et par le fait, les deux machines Gramme et Siemens, bien que primitivement conçues comme génératrices, constituent des moteurs à bien meilleur rendement que les premiers appareils électro-magnétiques de Jacobi, de Froment et de Page.

M. Gramme a produit, il y a une dizaine d'années, une forme spéciale de dynamo, représentée dans les figures 216 et 217, et appropriée au transport électrique de la force. Elle était munie de quatre pièces polaires entourant l'anneau et de quatre balais.

De petites machines de différents types ont été cependant spécialement construites comme moteurs dans ces dernières années.

En 1879, M. Marcel Deprez a imaginé une forme très commode de petit moteur. C'est une simple bobine Siemens en double T, montée longitudinalement entre les branches parallèles d'un aimant en acier. Son commutateur étant en deux parties, il avait le défaut de présenter un point mort. Ce défaut a été corrigé par l'emploi de deux armatures en avance de 90° l'une sur l'autre, de

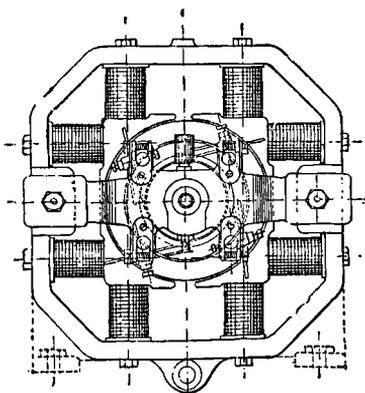


FIG. 217. — Moteur Gramme à 4 pôles (élévation).

telle sorte que, l'une étant au point mort, l'autre fût en pleine action.

Un petit moteur très commode (fig. 218) et s'adaptant aux machines à coudre a été imaginé par M. Griscom : il est bien connu aux États-Unis et en Europe. Comme le précédent, ce moteur a une simple armature Siemens en double T; mais son champ magnétique est constitué par des électro-aimants à noyaux en fonte malléable recouverts de bobines en série sur l'armature. D'après MM. les professeurs Ayrton et Perry, la puissance utile la plus considérable que puisse fournir le moteur Griscom de dimensions ordinaires est de 0,015 cheval (1,125 kilogrammètre par seconde) avec un rendement de 13 p. 100.

Il y a, en réalité, un si vaste champ d'applications industrielles pour les moteurs électriques dès qu'on aura à sa disposition, dans les villes, une alimentation régulière en courants électriques,

qu'un grand nombre d'inventeurs ont porté leur attention sur cette branche d'études. A côté des petits moteurs Griscom, Howe, Deprez, Cuttriss, Trouvé et autres, adaptés au travail des machines à coudre et des outils demandant peu de force, on trouve sur le marché des moteurs plus grands, capables d'actionner des tours et

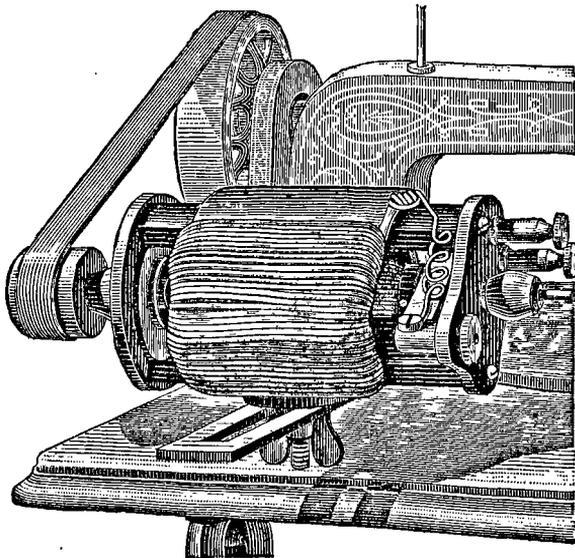


FIG. 218. — Moteur électrique Griscom.

de grosses machines-outils, et qui ne sont pas encore bien connus du public.

MM. Siemens ont construit un treuil ou élévateur électrique¹, dans lequel une petite dynamo, tournant elle-même très rapidement, actionne une vis sans fin, et communique un mouvement lent mais puissant à un tambour sur lequel s'enroule la chaîne de traction. Si l'alimentation des villes en électricité était un fait accompli, l'emploi de ce genre d'élévateurs prendrait une grande extension.

Le D^r Hopkinson a également inventé un treuil électrique (fig. 219) dans lequel l'armature du moteur, tournant à une grande vitesse, actionne la chaîne du treuil par l'entremise d'un train d'en-

1. Voir l'*Électricien*, du 10 janvier 1883, t. IX, p. 20.

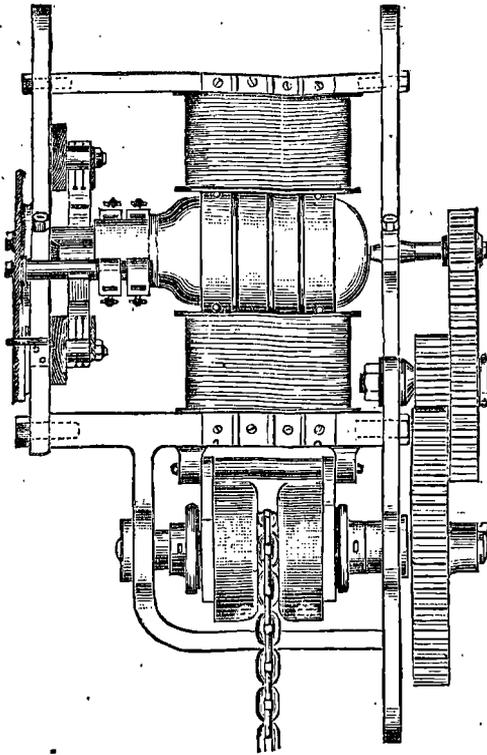


FIG. 219. — Treuil électrique Hopkinson.

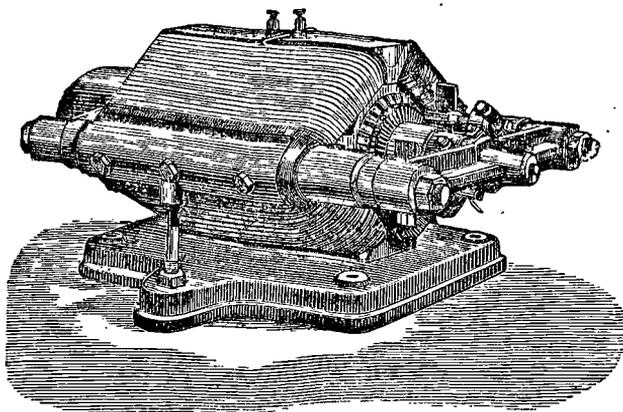


FIG. 220. — Moteur électrique de Méritens.

grenages qui réduit la vitesse. Ce treuil fonctionnait à l'Exposition de Paris, en 1881, à côté d'un Ascenseur de MM. Siemens frères.

Un autre type de moteur (fig. 220) a été inventé par M. de Méritens, qui emploie une armature en anneau tout à fait semblable à celle de Gramme, mais qui la monte entre des électro-aimants très compacts et très légers, servant en même temps de bâti à la machine.

MM. les professeurs Ayrton et Perry ont publié une longue série d'épreuves expérimentales faites sur le moteur de Méritens¹,

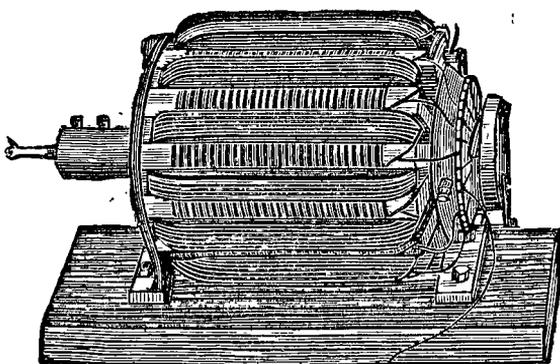


FIG. 221. — Moteur Ayrton et Perry actionnant un foret.

épreuves d'où il résulte qu'un de ces moteurs, pesant 32,5 kilogrammes et produisant une force de $\frac{3}{4}$ de cheval ou 57 kilogrammètres par seconde, avait un rendement de 50 p. 100.

MM. les professeurs Ayrton et Perry ont eux-mêmes imaginé un moteur ingénieux très compact et d'une puissance considérable relativement à son poids. Dans ce moteur (fig. 221), l'armature est fixe et l'électro-aimant se meut à l'intérieur. Ce mode de construction, qui permet de donner au bâti de la légèreté et de la solidité à la fois, avait été précédemment essayé dans une dynamo — dite « Machine-Pot » — exposée à Paris par MM. Siemens, en 1881. L'électro-aimant du moteur Ayrton et Perry, représenté séparément dans

1. *Journal of the Society of Telegraph Engineers and Electricians*, t. XII, n° 49, 1883.

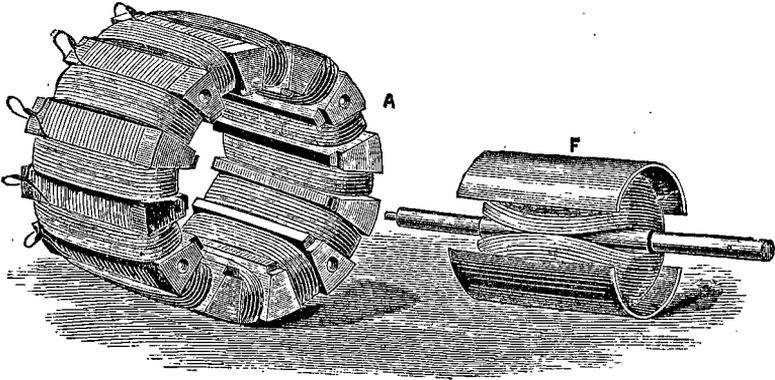


FIG. 222. — Induit et inducteur du Moteur Ayrton et Perry.

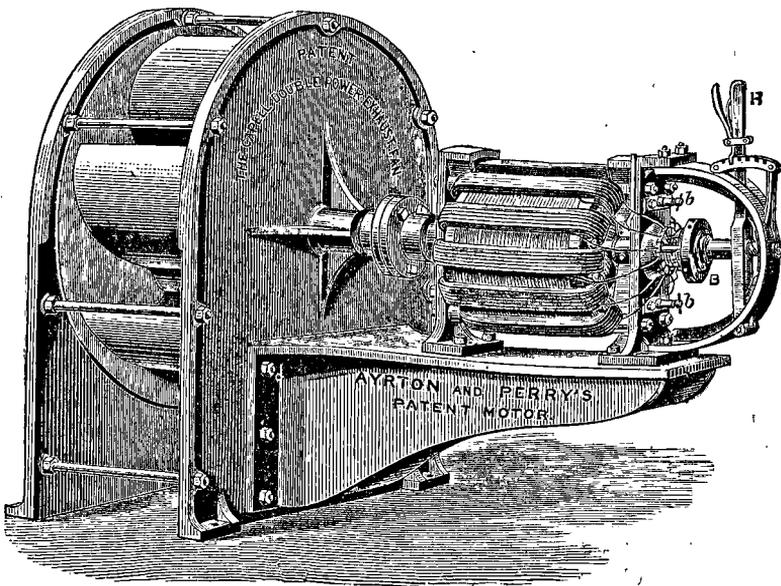


FIG. 223. — Moteur électrique actionnant un ventilateur.

la figure 222, est du type de la simple bobine Siemens en double T. L'armature est un anneau allongé, du genre Pacinotti, à dents en saillie, entre lesquelles sont roulées les bobines élémentaires; cet anneau est formé de disques plats en tôle douce dentelés. Les balais tournent avec l'électro-aimant et le commutateur ou collecteur est fixe.

Cette machine se prête admirablement à l'application du changement de marche décrit page 376. La figure 223 représente un de ces moteurs actionnant un ventilateur; dans la figure 221 un foret est directement actionné par l'arbre même de la machine. Ces moteurs se montent généralement en série; mais nous devons aux infatigables travailleurs dont ils portent le nom la théorie¹ de l'adaptation du double enroulement à des moteurs ainsi rendus auto-régulateurs. Ils ont introduit le système d'enroulement différentiel dans quelques-unes de leurs machines. Leur moteur, pesant environ 17 kg. et donnant une force de $\frac{1}{5}$ de cheval (15 kilogrammètres par seconde) à 1570 révolutions par minute, fournit un rendement net de 40 p. 100. Les données suivantes sont extraites de résultats d'épreuves faites sur diverses formes de moteurs Ayrton et Perry :

POIDS DES MOTEURS en KILOGRAMMES.	FORCE RÉELLE Fournie SUR L'ARBRE DE ROTATION	
	en chevaux.	en kilogrammètres par seconde.
16,750	0,35	26,25
25, »	0,50	37,50
34, »	0,75	56,25
43,500	1,50	112,50
56,700	2,20	165, »

M. A. Reckenzaun a construit un moteur du poids de 56,25 kilo-

1. La théorie de MM. les professeurs Ayrton et Perry va même bien au delà; elle s'étend à tous les cas ci-dessous mentionnés d'enroulements en série ou en dérivation combinés avec une aimantation constante indépendante, ou avec une machine magnéto indépendante montée sur le même arbre. Leur mémoire publié dans le *Journal of the Society of Telegraph Engineers* (mai 1883) est une mine féconde en renseignements précieux. La spécification de leur brevet Anglais comprend à peu près toutes les combinaisons possibles d'auto-régulation, ainsi qu'un grand nombre d'autres modes de réglage des moteurs à l'aide de régulateurs périodiques et à force centrifuge analogues à ceux des machines à vapeur.

grammes qui, à une vitesse de 1550 révolutions par minute, absorbe 2,55 chevaux électriques et développe une puissance mécanique de 1,37 cheval. Ce qui correspond à deux kilogrammètres par seconde sur l'arbre par kilogramme de poids du moteur. Son armature est formée d'un certain nombre de petits torons de fer revêtus de fil et réunis à l'aide de boulons en une carcasse hexagonale légère et forte en même temps. La résistance de l'armature est de 0,4 ohm, celle de l'électro-aimant de 0,17 ohm. Ce moteur peut être comparé à une dynamo Siemens pesant 235 kilogrammes qui, à une vitesse de 906 tours par minute, donnait, suivant MM. les professeurs Ayrton et Perry, 4,96 chevaux de force avec un rendement de 74,6 p. 100. Une autre machine Siemens « D² », employée comme moteur dans le bateau électrique exposé à Vienne en 1883, donnait 7 chevaux de force sur l'arbre en absorbant 9 chevaux électriques, avec un rendement de 78 p. 100 environ. Elle pesait 298 kilogrammes, ce qui correspondait à 1 kilogramme de poids mort pour 1,76 kilogrammètre par seconde développé sur l'arbre.

L'auteur a également imaginé pour de faibles efforts un petit moteur qui présente quelques avantages sur ceux de Deprez et de Griscom.

Les électro-aimants, qui servent en même temps de socle au moteur, sont en fonte malléable et d'un modèle qui permet de les fondre en une ou deux pièces au plus. Ils ont la forme d'un électro-aimant de Joule, avec de fortes pièces polaires, et sont roulés de spires, partie en tension, partie en dérivation, dans des proportions qui donnent une vitesse constante quand ils fonctionnent sous l'action d'une force électromotrice d'un certain nombre de volts.

Comme armature, la forme adoptée pare aux points morts sans complications inutiles. Ce résultat est obtenu par une modification de l'ancienne armature Siemens consistant à envelopper en quelque sorte une de ces bobines en double T dans une autre qui lui est perpendiculaire. La bobine ainsi doublée, il faut naturellement doubler les segments du commutateur qui devient, par suite, un collecteur en quatre parties.

L'armature ne contient pas de parties de fer massives ; les âmes sont faites de minces feuilles de tôle estampées et fortement serrées

les unes contre les autres. Pour des moteurs plus grands, il est préférable d'employer une armature à sections plus nombreuses et douée d'un moment d'inertie plus considérable. Pour les petits moteurs, une armature en 4 parties suffit. Malgré l'intermittence des impulsions du courant, l'inertie mécanique des parties mobiles régularise le mouvement.

Dans le cas des machines génératrices, nous avons reconnu que, pour produire des courants constants, il fallait multiplier le plus possible les bobines élémentaires de l'armature, groupées autour d'un anneau ou d'un tambour, ce qui implique un enroulement compliqué et un appareil collecteur formé d'un grand nombre de segments. Il n'en est pas de même des moteurs, et l'on n'est pas astreint à la même subdivision; il suffit de disposer les bobines de manière à éviter les points morts. Je ne dis pas que, pour des moteurs de grandes dimensions, il ne soit pas avantageux de multiplier les sections de l'armature et les segments du collecteur pour d'autres raisons — comme pour parer aux étincelles aux balais; mais, pour ce qui est d'assurer la régularité du mouvement, l'inertie des parties mobiles épargne — à un certain degré dans les petites machines — la complication de certains éléments indispensables pour les machines génératrices.

CHAPITRE XXII

RENVERSEMENT DE MARCHE DES MOTEURS

Ainsi que nous l'avons vu précédemment, on peut renverser la marche d'un moteur en renversant simultanément le courant dans

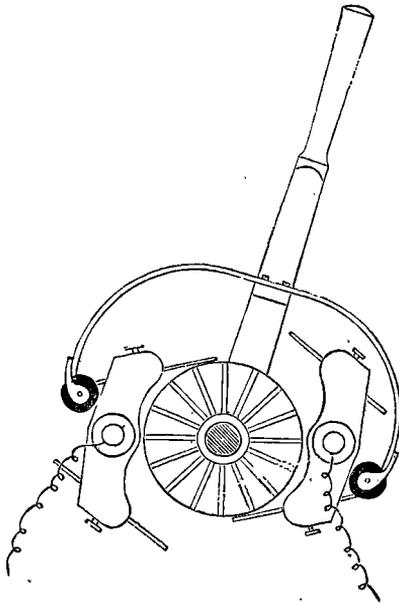


FIG. 224. — Inverseur de marche pour moteur électrique.

l'armature et le calage des balais. Mais le renversement du courant peut également s'effectuer en faisant tourner les balais de 180 degrés. Par suite, ces deux opérations peuvent s'effectuer en avançant sim-

plement les balais de $180^\circ - 2\varphi$, φ étant l'angle de calage primitif des balais. Mais, comme les balais se trouveraient alors calés à contre marche, il vaut mieux avoir recours à un second jeu de balais. Cette méthode d'inversion est celle du D^r Hopkinson. Il emploie deux paires de balais mobiles chacune autour d'un axe commun de telle sorte que, l'une d'entre elles étant inclinée dans un sens et l'autre en sens contraire, on puisse indifféremment et à volonté les appliquer sur le collecteur.

La figure 224 représente un inverseur de marche conçu par M. A. Reckenzaun pour les machines motrices du bateau *Electricity*. Il comporte deux paires de balais; les deux balais supérieurs sont fixés à un porte-balais commun qui tourne autour d'un axe, et peut se manœuvrer à droite ou à gauche à l'aide d'un levier; les deux balais inférieurs sont également fixés à un support. Contre chaque porte-balais vient presser un petit galet en ébonite, monté à l'extrémité d'un ressort en acier, supporté lui-même en son milieu par le levier. Cette disposition permet d'appliquer, par la manœuvre du levier, les balais d'un côté ou de l'autre, et de faire ainsi tourner le moteur dans un sens ou dans l'autre. L'inverseur de marche est une addition essentielle pour l'application industrielle des moteurs, et, si l'on peut arriver à supprimer aux balais les étincelles déterminées par leur brusque séparation du collecteur, on aura là un mode d'inversion de mouvement bien supérieur à tous les moyens mécaniques, en le transportant par un système quelconque de l'axe du moteur à un autre arbre.

Un des avantages des moteurs électriques réside dans la facilité avec laquelle ils peuvent être directement attelés à l'arbre de la machine qu'ils doivent actionner; cet avantage est loin d'être sans importance.

MM. les professeurs Ayrton et Perry ont imaginé une autre forme d'inverseur de marche¹. Il se compose d'un double collier monté sur l'arbre du moteur; l'un d'entre eux, le collier intérieur, est muni d'une broche engagée dans une rainure hélicoïdale pra-

1. Voir *l'Électricien*, n° 58, 1^{er} septembre 1883, t. VI, pp. 223 et 224.

tiquée dans l'arbre, et se meut librement le long de celui-ci. Tout déplacement qui lui est donné à l'aide du levier, à travers le collier extérieur, déplace la broche ci-dessus dans la rainure et fait tourner d'un certain angle le collier auquel elle est fixée. Ce collier, dans le moteur Ayrton et Perry, supporte les balais, dont il modifie le calage suivant le mouvement de rotation qui lui est donné dans un sens ou dans l'autre. Le moteur représenté dans la figure 223 est muni de cet inverseur de marche, bien qu'il soit inutile pour la manœuvre d'un ventilateur.

L'auteur a également imaginé d'autres modes de renversement de marche pour petits moteurs; il découpe en hélice les segments du collecteur ou commutateur, ce qui lui permet de changer le calage en faisant glisser simplement les balais en avant ou en arrière, parallèlement à l'axe du moteur.

Théoriquement, il est également possible de construire un moteur marchant en sens inverse à l'aide d'un simple renversement de courant dans la partie-armature; à cet effet, les pièces polaires doivent être conformées de telle sorte que, les balais étant calés sans aucune inclinaison, l'angle que fait le diamètre de commutation avec le pôle effectif dans la pièce polaire soit celui qui est nécessaire à la marche régulière. Ce résultat une fois obtenu, il suffira de renverser simplement la polarité dans l'inducteur ou dans l'induit pour renverser la marche du moteur.

CHAPITRE XXIII

VITESSE ET COUPLE MÉCANIQUE D'UN MOTEUR EN FONCTION DU COURANT QUI L'ALIMENTE

Il existe certaines relations de la plus haute importance entre les conditions d'alimentation électrique d'un moteur et sa vitesse ainsi que le moment du couple qu'il développe.

Suivant ce que nous avons rappelé (p. 104), vers la fin du Chapitre VI, sur les moyens de gouverner les machines génératrices, la force transmise par un arbre est le produit de deux facteurs, sa vitesse et le moment du couple qu'il développe. Si ω représente la vitesse angulaire et \bar{C} le moment du couple¹,

$\omega \bar{C} =$ le travail mécanique par seconde, ou « l'activité »,

et cette activité, mesurée électriquement, est égale (à part la fraction consommée en frottements, etc.) à l'énergie électrique absorbée par seconde; ou, si E est la force électromotrice du moteur, et i le courant qui circule dans son armature,

1. n étant le nombre de révolutions *par seconde*, $2 \pi n = \omega$. Dès lors, si F est l'effort en kilogrammes transmis sur la courroie (ou plutôt la différence entre l'effort sur le brin de la courroie qui s'approche de la poulie d'entraînement et l'effort sur le brin qui s'en éloigne), et r le rayon de la poulie, $F r =$ le moment du couple $= \bar{C}$, et alors $\omega \bar{C} = 2 \pi n r F =$ le nombre de kilogrammètres par seconde transmis par la courroie. — On arrive au même résultat par un autre mode de démonstration : la puissance en chevaux-vapeur est le produit de la force par la vitesse. La poulie ayant une circonférence égale à $2 \pi r$, et faisant n tours par seconde, sa vitesse circonférentielle est $2 \pi r n$, et ce produit, multiplié par F , donne le travail par seconde. Si F est exprimé en grammes et r en centimètres, le produit $2 \pi r n F$ donnera l'activité en grammes-centimètres; il faudra le diviser par $7,5 \times 10^6$ pour le transformer en chevaux-vapeur et le multiplier par 981×10^{-7} pour le réduire en watts.

$Ei =$ le travail électrique par seconde (en watts¹).

Or nous savons que, si le courant qui circule dans une dynamo en série est constant, la force électromotrice développée est presque exactement proportionnelle à sa vitesse. Il en résulte donc que, si E est proportionnel à ω , \mathcal{C} sera proportionnel à i . L'expérience confirme ce fait de tous points dans le cas d'un moteur en série. Ainsi, dans un treuil électrique, une machine Siemens disposée pour monter une charge de 25 kilogrammes élevait cette charge avec une vitesse de 1,08 mètre par seconde, en développant une force contre-électromotrice de 108,81 volts. La force électromotrice mise en œuvre était de 111 volts et la résistance du circuit de 0,3 ohm. La force électromotrice effective était donc de 2,19 volts, et le courant de 7,3 ampères. Quand on portait la résistance du circuit à 2,2 ohms, la vitesse tombait à 0,86 mètre par seconde; la force contre-électromotrice à 94,94 volts; la force électromotrice effective, $\mathcal{E} - E$, était par suite de 16,06 volts et le courant de 7,3 ampères comme précédemment. Quand on mettait 4,8 ohms en circuit, la vitesse baissait à 0,716 mètre par seconde, et E à 76 volts. $\mathcal{E} - E$ était de 35 volts, et le courant encore de 7,3 ampères. Ainsi donc *à un même effort correspond le même courant*, quelle que soit la vitesse. La vitesse d'un moteur monté en série dépend donc uniquement de la force électromotrice du générateur et de la résistance du circuit.

Avec un moteur monté en dérivation, il n'en est plus de même. Ici, l'activité de l'armature est Ei_a watts, i_a étant le courant qui circule dans l'armature. Mais, dans une dynamo en dérivation fonctionnant comme génératrice, le courant développé est approximativement proportionnel à la vitesse, si la différence de potentiel entre ses bornes est constante, c'est-à-dire que i_a est sensiblement proportionnel à ω . Dans ce cas, \mathcal{C} est par suite proportionnel à E . Par conséquent, avec une charge constante, un moteur en dérivation doit développer une force électromotrice constante, quels que soient le courant et la vitesse.

1. Du moment où 1 volt = 10^8 unités C. G. S., et 1 ampère = 10^{-1} unité C. G. S., 1 watt (ou volt-ampère) sera = 10^7 unités C. G. S. de travail par seconde = 10^7 ergs par seconde, = $\frac{10^7}{981}$ grammes-centimètres par seconde.

Cette constance ne se vérifie pas absolument dans la pratique, en raison de la résistance inévitable de l'armature et des réactions entre les inducteurs et l'induit. Mais sans ces réactions, un moteur monté en série tournerait à une vitesse absolument constante, s'il était alimenté par une énergie électrique sous potentiel constant — quelle que fût sa charge; et un moteur en dérivation tournerait à une vitesse constante, s'il était alimenté par un courant constant, — quelle que fût sa charge.

Le fait que le moment d'un moteur en série dépend uniquement de l'intensité du courant qui l'alimente est avantageux pour l'application des moteurs à la traction des voitures (telles que les tram-cars), qui exigent au départ, pendant quelques secondes, un effort de beaucoup supérieur à celui qui leur est nécessaire en marche normale. Au débrayage, il faut fournir un courant de grande intensité.

CHAPITRE XXIV

MOYENS DE GOUVERNER LES MOTEURS

Il est de la plus haute importance que les moteurs électriques soient disposés de manière à tourner à une vitesse uniforme, quel que soit l'effort qui leur est demandé. Pour actionner un tour, par exemple, et en général une machine-outil quelconque, il est essentiel que la vitesse soit régulière, et que le moteur ne « s'emporte » pas dès que l'outil vient à être éloigné de la pièce et cesse de travailler.

M. Marcel Deprez a essayé un des premiers, en 1878, de réaliser automatiquement cette régulation de vitesse; il a adopté à cet effet une ingénieuse disposition réglant d'une façon parfaitement déterminée l'admission du courant par l'introduction d'un interrupteur à ressort dans le circuit. Le moteur employé avait un simple commutateur en 2 pièces qui, par sa rotation même, réglait les fermetures et les ruptures du courant. On a vu à Paris, il y a quatre ou cinq ans, un moteur Deprez ainsi régularisé. Ce moteur tournait à une vitesse parfaitement uniforme, absolument indépendante de l'effort qu'on lui demandait. Soit qu'il soulevât un poids de 5 kilogrammes au-dessus du sol, soit qu'il le laissât redescendre, ou encore qu'on lui retirât toute sa charge, sa vitesse restait la même. Cette méthode n'est cependant pas applicable à des moteurs puissants.

Régulateurs à Force centrifuge.

... Un autre système, également inapplicable sur une grande échelle, consiste à adapter un régulateur à force centrifuge ouvrant

le circuit chaque fois que le moteur dépasse une certaine vitesse. Le moteur a dans ces conditions une marche spasmodique tantôt rapide tantôt lente. — On peut encore employer un régulateur à force centrifuge pour faire varier la résistance d'une partie du circuit ; pour actionner, par exemple, une disposition automatique dérivant des électro-aimants une partie du courant d'une dynamo en série (dans le genre du régulateur automatique de la machine Brush dont nous avons parlé p. 102), ou pour introduire dans les électro-aimants d'une machine montée en dérivation une résistance additionnelle proportionnelle à la vitesse.

MM. les professeurs Ayrton et Perry ont également proposé plusieurs formes de régulateurs « périodiques » à force centrifuge ; dans leur système, la force est fournie à chaque tour pendant une partie seulement de la révolution, et la durée relative de cette alimentation par tour de la machine varie avec la vitesse. La principale difficulté avec ces régulateurs est d'éviter les étincelles. — Tous les régulateurs à force centrifuge présentent d'ailleurs un défaut encore plus radical ; ils agissent trop tard. Ils ne remplissent leur rôle que quand la vitesse a varié ; or un régulateur parfait ne doit pas avoir besoin d'attendre que la vitesse ait varié pour fonctionner.

Régulateurs Dynamométriques.

L'auteur a imaginé un autre genre de régulateur auquel ne s'applique pas cette dernière objection. Il propose d'employer un dynamomètre monté sur l'arbre du moteur, pour actionner un appareil de régulation constitué soit par un régulateur périodique dérivant ou interrompant le courant pendant une partie de chaque révolution, soit par une résistance variable intercalée dans une portion du circuit. L'appareil dynamométrique peut être d'un type quelconque, dynamomètre à courroie (comme celui de M. von Hefner Alteneck) ou dynamomètre à poulie (tel que celui de Morin ou de Smith). Dans cette dernière disposition, qui est la plus pratique, une poulie folle tournant sur l'arbre du moteur est reliée par un montage à ressort à une poulie fixe. Le moteur, dans sa rotation, entraîne la poulie fixe en avance sur la poulie folle, et cette avance

angulaire est proportionnelle au moment du couple. Cette avance angulaire arrivée à un certain point met alors en jeu le système de régulation. Le régulateur fonctionne donc ici non pas sous l'action de la vitesse du moteur, mais sous l'action de l'effort qu'il exerce. Tout changement dans l'effort agit instantanément sur le régulateur dynamométrique, avant que la vitesse ait le temps de varier.

Régulateurs Électriques.

Un autre mode de régulation, qui n'exige aucun mouvement de rotation, a encore été proposé par l'auteur. Les électro-aimants sont ici constitués par un double jeu de pôles disposés sous des angles différents par rapport aux balais du moteur. Une paire de pôles magnétiques, ayant une certaine inclinaison, est soumise à l'action de bobines en série; l'autre paire, ayant une inclinaison différente, est soumise à l'action de bobines en dérivation. Quand les deux groupes de bobines en série et en dérivation fonctionnent, ils donnent naturellement naissance à un pôle résultant ayant une inclinaison intermédiaire. Si l'effort demandé au moteur diminue, sa vitesse tend à augmenter, en déterminant un accroissement de courant dans les électros dérivés et une diminution dans les électros en série; d'où, modification dans l'inclinaison effective et obstacle à l'accélération du moteur.

Un autre mode de régulation électrique, dû à M. Deprez, consiste à sectionner les bobines d'électro-aimants, et à obtenir une régulation automatique en modifiant suivant les besoins le nombre des sections en circuit ou leur mode de couplage.

La méthode de régulation automatique la plus parfaite en théorie est, sans aucun doute, celle imaginée par MM. les professeurs Ayrton et Perry, et décrite dans le travail qu'ils ont publié dans le *Journal of the Society of Telegraph Engineers*¹. La théorie d'auto-régulation exposée par eux demande une étude attentive. Elle est développée dans les pages suivantes; mais il est bon de prévenir le lecteur que, pour éviter toute confusion dans l'emploi des symboles, nous n'avons pas suivi la notation de MM. les professeurs

1. Tome XII, mai 1883.

Ayrton et Perry; les symboles employés par nous ont la même signification que dans les chapitres précédents. L'auteur n'a pas adopté non plus la partie de la démonstration de MM. les professeurs Ayrton et Perry dans laquelle ils envisagent une portion du moteur comme faisant frein sur une autre portion. Cette manière d'envisager la question, assurément fondée en principe sur de justes raisons, ne s'impose pas à l'esprit d'une manière générale. L'auteur préfère regarder l'emploi d'un enroulement en dérivation opposé à un enroulement en série — qui est le résultat final de cette méthode de régulation — comme un simple enroulement différentiel destiné à produire un certain résultat.

Théorie des Moteurs Auto-régulateurs.

Dans le chapitre consacré à l'auto-régulation des machines dynamo-électriques, nous avons indiqué, avec tous les développements algébriques qu'elles comportent (pages 248 à 273), les diverses solutions du problème relatif au montage d'une machine devant, sous vitesse constante, fournir à un circuit l'énergie électrique dans l'une des deux conditions de potentiel constant ou d'intensité constante. La solution générale du problème consistait dans l'emploi de certaines combinaisons d'électro-aimants, donnant un champ initial indépendant du courant dans le circuit principal.

On conçoit aisément qu'on puisse maintenant renverser le problème et construire des moteurs à électro-aimants combinés de telle façon qu'ils fonctionnent à une vitesse constante, quel que soit le travail qui leur est demandé, s'ils sont alimentés dans l'une des conditions-types de distribution. Il est évident sans calculs numériques, que les enroulements doivent se faire opposition mutuelle, — l'un tendant à désaimanter les électro-aimants, l'autre tendant à les aimanter. — Prenons le cas d'un moteur monté en dérivation, alimenté sous un potentiel constant \mathcal{E} , et tournant à une certaine vitesse avec une certaine charge. Si la charge est brusquement enlevée, le moteur va commencer à s'emporter; il en résultera un accroissement de la force contre-électromotrice développée et un affaiblissement du courant d'armature. Mais la diminution

de courant ne sera pas suffisante pour ramener la vitesse à sa valeur primitive, en raison de la résistance interne de l'armature, qui s'est opposée à l'utilisation, comme travail, de toute l'énergie du courant d'armature. Une bobine démagnétisante de puissance convenable, roulée sur l'électro-aimant et montée en série, produira cependant l'effet voulu; une augmentation quelconque de vitesse déterminera alors, en effet, une réduction du champ magnétique qui affaiblira immédiatement le couple moteur.

Cette combinaison peut, on le voit, être considérée à juste titre comme un enroulement différentiel.

Comme les enroulements des moteurs auto-régulateurs sont différents dans les deux cas de distribution, nous les examinerons séparément.

Alimentation sous Différence de Potentiel constante.

Cas (I.). — Moteur magnéto-électrique avec Bobines régulatrices en série. — En employant les mêmes notations que précédemment, nous avons, pour la force contre-électromotrice développée dans l'armature,

$$E = 4 n A H.$$

Or H se compose de deux parties, l'une *temporaire*, qui peut s'écrire $G \times Y i$, attendu qu'elle dépend de l'intensité du courant i , du nombre de spires Y , de la perméabilité du fer α , et de la constante géométrique G du noyau et des pièces polaires; l'autre *permanente*, qui peut s'écrire H_p , ou $G \times M$, M étant une certaine constante qui représente le magnétisme permanent.

On a donc

$$H = G \alpha (M - Y i),$$

du moment où l'aimantation temporaire des bobines en série est inférieure au magnétisme permanent et en opposition avec lui. Il en résulte pour la valeur de E —

$$E = 4 n A G \alpha (M - Y i),$$

d'où

$$n = \frac{E}{4 A G \alpha (M - Y i)}$$

Mais E peut revêtir une autre expression; car, si \mathcal{E} est le potentiel constant d'alimentation par les conducteurs principaux, et $r_a + r_m$ la résistance du moteur,

$$i = \frac{\mathcal{E} - E}{r_a + r_m},$$

ou

$$E = \mathcal{E} - (r_a + r_m) i,$$

d'où

$$n = \frac{\mathcal{E} - (r_a + r_m) i}{4 A G z (M - Y i)}, \quad [\text{LI.}]$$

et cette valeur doit être *constante*, ce qui exige que

$$\frac{\mathcal{E}}{M} = \frac{r_a + r_m}{Y}, \quad [\text{LII.}]$$

qui est la condition d'auto-régulation. Cette condition étant remplie, la vitesse constante du moteur sera déterminée par l'équation

$$n = \frac{\mathcal{E}}{4 A \Pi_1} = \frac{r_a + r_m}{Y} \cdot \frac{1}{4 A G z}. \quad [\text{LIII.}]$$

Cette vitesse, qui est la vitesse critique pour le potentiel \mathcal{E} , peut être déterminée expérimentalement; c'est en effet *la vitesse à laquelle le moteur, actionné comme une dynamo en circuit ouvert* (c'est-à-dire sous la seule influence de la portion permanente du magnétisme), *maintiendra une force électromotrice égale à celle sous laquelle se fait l'alimentation par les conducteurs*. Il est par suite évident qu'en donnant plus d'intensité au magnétisme permanent, on pourra réduire la vitesse critique à une valeur déterminée quelconque.

Détermination pratique du Potentiel et de l'Enroulement convenables pour un Moteur donné¹.

Supposons un moteur constitué par des aimants en acier et une armature donnée; on demande de déterminer d'une part le potentiel sous lequel il four-

1. Il est à remarquer que ce procédé diffère de celui indiqué par MM. les professeurs Ayrton et Perry dans leur travail sur les moteurs électriques, reproduit par le recueil précité (*Proc. Soc. Telegr. Eng.*, mai 1883). Leur méthode dépend du volume laissé sur les bobines des électro-aimants, que l'on suppose constant.

nira une certaine vitesse constante, et d'autre part l'enroulement à adopter pour la bobine démagnétisante¹. Deux expériences sont nécessaires. On fera d'abord tourner le moteur à circuit ouvert comme génératrice à la vitesse fixée et on observera le potentiel aux bornes. On obtiendra ainsi le nombre de volts \mathcal{E} sous lequel il doit être alimenté. En second lieu, on reliera en série sur l'armature une résistance un peu inférieure à r_a (soit des cinq sixièmes de r_a) pour représenter r_m . On disposera des accumulateurs en quantité suffisante pour donner le potentiel convenable \mathcal{E} d'alimentation. On roulera une bobine provisoire de Y tours sur l'électro-aimant que l'on pourra ainsi exciter momentanément par une action démagnétisante provenant d'une source extérieure de courant variable à volonté. On mesurera ce courant d'excitation à l'aide d'un ampère-mètre et le courant d'armature à l'aide d'un second ampère-mètre. Puis, au moyen d'un frein dynamométrique convenable, on appliquera sur l'arbre du moteur sa charge normale maxima. On alimentera son armature par un courant sous potentiel \mathcal{E} , et on fera varier l'aimantation dans la bobine provisoire jusqu'à ce qu'on l'amène de nouveau à l'allure demandée : on notera le courant actuel i_a dans l'armature et le courant temporaire d'excitation i'_m . Il est clair dès lors que le nombre de tours cherché sera

$$Y = \frac{Y' i'_m}{i_a},$$

et il ne restera plus qu'à choisir un fil tel que Y tours aient une résistance égale à r_m .

Cas (II.). — Moteur monté en dérivation avec Bobines régulatrices en série. — Ce cas en comprend réellement deux : celui où la dérivation est prise uniquement sur l'armature, et le cas de montage « en longue dérivation », c'est-à-dire où la dérivation est prise sur les bornes de la machine (comme dans la fig. 162, p. 263). Ce dernier cas, dont la réalisation est pratiquement préférable, est celui choisi pour les calculs ci-après. On a ici

$$E = 4 n A G z (Z i_d - Y i_a),$$

et

$$E = \mathcal{E} - (r_a + r_m) i_a,$$

avec

$$\mathcal{E} = r_d i_d;$$

d'où

$$n = \frac{r_d i_d - (r_a + r_m) i_a}{4 A G z (Z i_d - Y i_a)},$$

1. Ici, comme dans d'autres passages relatifs aux enroulements *compound*, l'auteur parle d'une seule bobine roulée d'une façon spéciale; cette expression est parfaitement régulière, étant donné que, pour simplifier la démonstration, l'auteur a pris pour type

valeur qui doit être constante. On en tire comme condition nécessaire¹

$$\frac{Y}{Z} = \frac{r_a + r_m}{r_a}, \quad [\text{LIV.}]$$

et la vitesse est déterminée par l'équation

$$n = \frac{r_a}{4 A G z Z},$$

$$n = \frac{\mathcal{E}}{4 A G z Z i_a}. \quad [\text{LV.}]$$

En d'autres termes, Z et r_a doivent être tels que, si le moteur est actionné en circuit ouvert à la vitesse voulue n , le potentiel engendré aux bornes soit égal à \mathcal{E} .

Détermination de l'Enroulement.

Comme dans le cas précédent, il faut rouler et exciter séparément une bobine provisoire, en ajoutant à la résistance de l'armature une résistance égale à la résistance future r_m . Deux opérations sont encore nécessaires. On fera d'abord tourner le moteur sans charge au frein, en employant le potentiel convenable \mathcal{E} , et l'on excitera la bobine provisoire, en observant le nombre d'ampères-tours nécessaire pour ramener la vitesse à la valeur n demandée. Appelons P le nombre d'ampères-tours dans ce cas ; il est égal à $Zi - Yi_a$, i_a étant le courant le plus économique à employer dans la dérivation, et i_a le courant réel observé dans l'armature pendant l'expérience. On fera ensuite tourner le moteur sur toute sa charge au frein, et l'on excitera de nouveau le champ magnétique avec un nombre d'ampères-tours Q tel que la vitesse soit constante à n tours. Le courant i'_a observé sera alors différent. On aura ainsi :

$$P = Zi - Yi_a$$

$$Q = Zi - Yi'_a$$

d'où

$$P - Q = Y(i'_a - i_a)$$

et

$$Y = \frac{P - Q}{i'_a - i_a}.$$

Quant à Z , il pourra être déterminé d'après la relation fournie par l'équation [LIV.].

général *théorique* une machine à deux électro-aimants seulement ; mais il est clair que, dans la pratique, toutes les fois qu'il y a quatre électro-aimants, il y aura toujours avantage à équilibrer les électro-aimants et à rendre la machine symétrique, ce qui comportera modification de deux bobines au moins, au lieu d'une seule. (N du T.)

1. Ou, si l'on tient compte de l'aimantation due à la réaction de l'armature, comme il est dit à la page 391, $\frac{Y - A'}{Z}$ au lieu de $\frac{Y}{Z}$.

Il se présente cependant une difficulté sérieuse dans le fonctionnement des moteurs à enroulement différentiel construits d'après la théorie de MM. Ayrton et Perry. Si on lance le courant tout d'un coup pour les mettre en mouvement, l'armature étant encore immobile, il ne s'y développe pas de force contre-électromotrice; la majeure partie du courant passe dans l'armature et dans la bobine en série, et il en passe très peu dans la dérivation. Il en résulte que la bobine en dérivation qui doit fournir la plus grande portion de l'aimantation est moins active que la bobine en série, et que le moteur se met à tourner à contresens. On peut remédier à ce défaut en retirant du circuit la bobine en série jusqu'à ce que le moteur ait atteint sa vitesse, ou en faisant démarrer le moteur à la main et y lançant ensuite le courant.

Alimentation à Intensité constante.

Si la condition d'alimentation du moteur est celle d'une intensité constante, indépendante du travail du moteur, le cas est différent. Les principales combinaisons possibles sont les suivantes :

(a.) Moteur magnéto-électrique avec Bobines régulatrices en dérivation.

(b.) Moteur monté en série avec Bobines régulatrices en dérivation.

(c.) Moteur monté en série avec Bobines régulatrices en longue dérivation.

Les deux derniers cas, à enroulement différentiel, sont les seuls importants.

Cas (I).—Moteur en série avec Bobines régulatrices en dérivation.

$$E = 4 n A G z (Y i - Z i_a);$$

$$E = r_a i_a - r_a i_a;$$

$$i_a = i - i_a,$$

i étant le courant constant;

d'où

$$n = \frac{r_a i - (r_a + r_a) i_a}{4 A G z (Y i - Z i_a)},$$

ce qui donne comme équation de condition

$$\frac{Z}{Y} = \frac{r_d + r_a}{r_a}, \quad [\text{LVI.}]$$

et comme vitesse critique

$$n = \frac{r_a i}{Y i} \cdot \frac{1}{4 A G x}. \quad [\text{LVII.}]$$

Or $r_a i$ est la force électromotrice capable de lancer un courant égal au courant donné dans la résistance de l'armature. Il en résulte que la vitesse critique est celle à laquelle le moteur fonctionnant comme dynamo donnera une force électromotrice égale à $r_a i$ sous la seule action magnétisante du courant constant i parcourant la bobine en série de Y spires.

Détermination des Enroulements.

Les enroulements se déterminent de la manière suivante : On met en dérivation sur les balais une résistance provisoire égale à ce que sera r_d et l'on insère un ampère-mètre dans cette dérivation. Puis on monte sur l'électro-aimant une bobine provisoire d'un nombre connu de spires, qu'on excite séparément en observant le nombre d'ampères-tours. On lance dans l'armature munie de sa dérivation un courant égal au courant constant i , et l'on fait varier l'excitation jusqu'à ce qu'on obtienne la vitesse n . On commence par noter le nombre d'ampères-tours P nécessaire à l'excitation quand le moteur n'est pas chargé, le courant dérivé observé étant i'_d . Puis on relève le nombre d'ampères-tours Q nécessaire à l'excitation quand le moteur a son maximum de charge, le courant dérivé étant alors i''_d . On a dès lors

$$\begin{aligned} P &= Y i - Z i'_d; \\ Q &= Y i - Z i''_d; \\ Q - P &= Z (i'_d - i''_d); \end{aligned}$$

d'où

$$\frac{Q - P}{i'_d - i''_d} = Z.$$

Quant à Y , il peut être déterminé d'après l'équation [LVI.] ou d'après la valeur de P .

Cas (II.). — Moteur en série avec Bobines régulatrices en longue dérivation. —

$$\begin{aligned} E &= 4n A G x (Y i_a - Z i_a); \\ E &= r_a i_d - (r_a + r_m) i_a; \\ i_a &= i - i_d; \end{aligned}$$

d'où

$$n = \frac{(r_a + r_m) i_a - r_d i_d}{4 A G z (Y i_a - Z i_d)},$$

qui ne peut être constant qu'à la condition qu'on ait

$$\frac{Z}{Y} = \frac{r_d}{r_a + r_m}. \quad [\text{LVIII.}]$$

La détermination pratique de l'enroulement se fera d'une manière analogue au cas précédent; nous laissons au lecteur le soin de s'en rendre compte.

Dans toutes les équations qui précèdent, il n'a pas été tenu compte de la réaction du magnétisme de l'armature sur les électroaimants.

Cependant, pour les moteurs, cette réaction qui a pour effet de renforcer les bobines magnétisantes du champ est loin d'être négligeable; dans les moteurs dont la partie armature est grande et puissante, cet effet prend notamment une importance considérable. Il serait possible d'ailleurs de faire entrer en ligne de compte l'effet d'aimantation de l'armature en introduisant dans l'expression de H un terme proportionnel au courant i_a dans l'armature et au coefficient d'armature. La première équation du dernier cas ci-dessus deviendrait par exemple

$$E = 4 n A G z (Y i_a + A' i_a - Z i_d),$$

dans laquelle A' est le nouveau terme, et l'équation de condition N° [LVIII.] se transformerait en

$$\frac{Z}{Y + A'} = \frac{r_d}{r_a + r_m}.$$

Une expérience spéciale pour chaque moteur serait nécessaire à la détermination de A' .

Toutes les questions de self-induction ont d'ailleurs été laissées de côté; ici en effet, comme dans le cas des dynamos employées comme génératrices, nous admettons que, si la self-induction est

toujours nuisible, ses effets peuvent être réduits à une très faible valeur par une conception bien étudiée de la machine.

Il est plus que probable que, dans l'état imparfait de nos connaissances actuelles en ce qui concerne les moteurs et leurs propriétés, leur théorie devra subir, d'ici à quelques années, d'importantes modifications. Cette question ne peut rester dans son état actuel encore bien incomplet.

CHAPITRE XXV

SOLUTION PAR LES MÉTHODES GRAPHIQUES DE QUELQUES PROBLÈMES RELATIFS AUX MOTEURS

Parmi les problèmes suivants, les deux premiers sont relatifs aux moteurs montés en série; la solution en est due à M. Alexandre Siemens¹.

Étant donné un système de conducteurs de distribution fournissant l'électricité sous un potentiel constant \mathcal{E} , on demande de construire un moteur qui, fonctionnant sous une charge donnée, fasse n révolutions par minute.

Prenant, comme d'habitude, dans la figure 225, les intensités

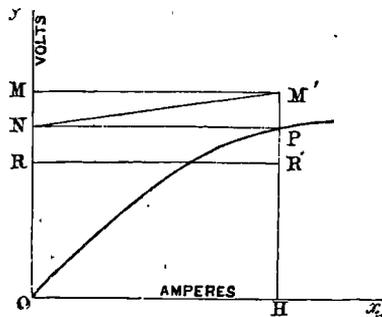


FIG. 225.

pour abscisses et les forces électromotrices pour ordonnées, représentons par OM le potentiel \mathcal{E} en volts dans le conducteur. Les

1. *Journal of the Society of Arts*, avril 1883.

constructeurs de machines savent par expérience quelle proportion de l'énergie électrique fournie à la machine du type dont il s'agit est absorbée pour le maintien du champ magnétique. Prenons sur OM un point N tel que $\frac{NM}{OM}$ représente cette proportion. On connaît également la proportion d'énergie, ainsi prélevée par l'armature et convertie en travail mécanique, consommée en frottements aux coussinets et aux balais. Choisissons le point R tel que $\frac{NR}{ON}$ représente le quantum d'énergie ainsi dépensé. Prenons sur l'axe des x OH tel que la surface $OHR'R$ représente l'activité mécanique réelle du moteur en watts. Si le moteur, par exemple, doit fournir 1 cheval-vapeur, la surface $OHR'R$ doit être égale à 736 watts. $O\Pi$ représente donc le courant (en ampères), et ΠP la force contre-électromotrice (en volts) que le moteur doit produire. Le moteur devra en conséquence être tel que, à une allure de n révolutions par minute, sa caractéristique passe par le point P . Le coefficient économique sera naturellement égal à $\frac{\Pi P'}{\Pi M'}$ et le rendement net à $\frac{\Pi R'}{\Pi M'}$.

L'énergie dépensée en production d'aimantation est mesurée par la surface $NPM'M$. La tangente de l'angle PNM' représente la résistance de l'induit et des inducteurs, dans le cas d'un moteur en série.

Il est possible de résoudre des problèmes analogues pour un moteur monté en dérivation, ainsi que pour le cas d'une distribution à intensité constante.

Étant donné un moteur ayant besoin d'un certain courant et d'une certaine force électromotrice pour effectuer le travail qu'on lui demande, construire une génératrice convenable, la distance entre les deux machines étant représentée par une résistance électrique de R ohms.

Soit OPP' (fig. 226) la caractéristique du moteur à l'allure demandée; $\Pi\Pi$ représentant les volts et OH le courant qu'il exige.

Menons PN parallèle à l'axe des x , et du point N traçons la ligne NM' sous un angle PNM' tel que sa tangente représente la

somme des résistances du moteur et de la ligne. $M'H$ représentera alors la différence de potentiel entre les bornes de la génératrice. Prolongeons ensuite HM' jusqu'en Q , de telle sorte que $\frac{HM'}{HQ}$ représente le coefficient économique de la machine du type à employer comme génératrice. La génératrice convenable sera celle qui, tournant à la vitesse voulue, aura une caractéristique passant par les points O et Q ; et la tangente de l'angle $M'MQ$ représentera la résistance de l'induit et des inducteurs de cette génératrice.

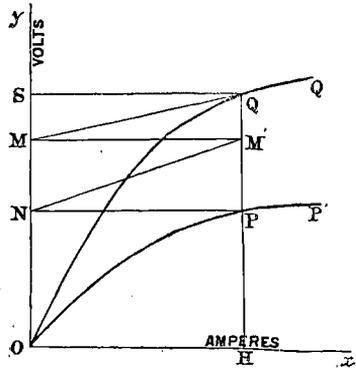


FIG. 226.

Le problème suivant est dû au D^r Hopkinson :

Étant donnée la caractéristique de la génératrice, on demande de déterminer le travail maximum qu'elle peut transmettre si sa force électromotrice dépend du courant qui circule dans son armature.

Ce problème se pose en raison de ce que la loi de Jacobi sur l'activité maxima ne tient pas compte des réactions produites par l'armature sur le champ magnétique. Si ces réactions n'intervenaient pas, l'activité du moteur serait maxima quand sa force contre-électromotrice serait égale à la moitié de celle de la génératrice. Soit OPB (fig. 227) la caractéristique de la génératrice. Une autre courbe se déduit de celle-ci de la manière suivante. Prenons un point quelconque P de la courbe, et menons la tangente PT en ce point. Menons TN parallèle à l'axe des x et coupant PM en N . Prolongeons MP jusqu'en L de telle sorte que $LP = PN$. En répétant cette opération pour les points successifs de la caractéristique, on obtiendra la courbe dérivée en question. Menons alors OA sous un angle tel que sa tangente d'inclinaison soit égale au double de la résistance du circuit total. Abaissons l'ordonnée AC qui coupe la caractéristique en B , et divisons-la

par moitié en D. L'activité de la génératrice est représentée par la surface du rectangle O C B R; la portion activité consommée sous forme de chaleur est représentée par la surface O C D S; celle uti-

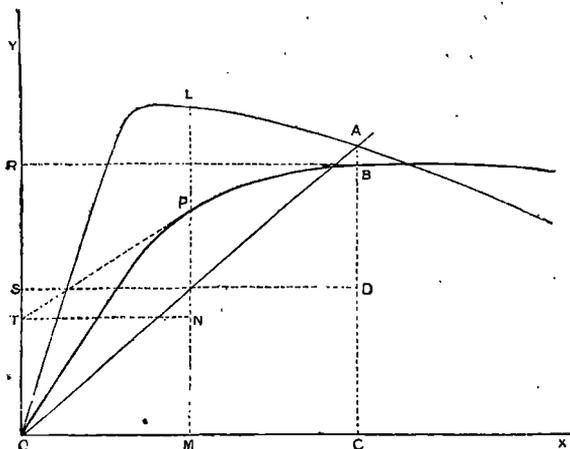


FIG. 227.

lisée dans le moteur, par S D B R. On voit que dans ce cas le rendement sera inférieur à 50 p. 100.

Un autre mode graphique de comparaison entre la puissance et

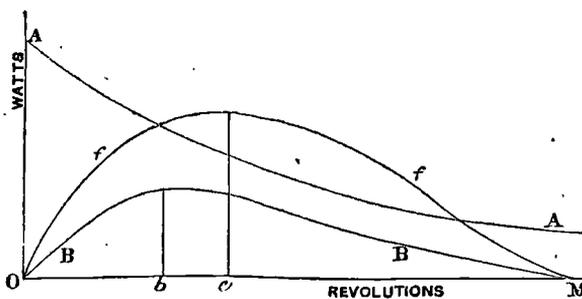


FIG. 228.

Le rendement d'un moteur a été proposé par M. Gisbert Kapp. Les vitesses étant prises comme abscisses, la puissance électrique en chevaux-vapeur absorbée est représentée par les ordonnées, qui correspondent aux nombres de watts divisés par 736. La figure 228 donne en AA le tracé de la courbe dont la forme variera suivant

le type de machine, moteur monté en série dans le cas actuel. On construit ensuite une seconde courbe BB , dont les ordonnées sont la puissance en chevaux observée à différentes vitesses. Dans les deux cas, on obtient les variations de vitesse en faisant varier les charges à l'aide d'un frein dynamométrique. Avec une charge considérable, la vitesse est faible, et la force électromotrice mise en œuvre très grande. Sans charge, on obtient une certaine vitesse maxima OM à laquelle (grâce à la force contre-électromotrice développée) il passe peu de courant. Entre ces deux extrêmes, il existe un point b correspondant à une certaine vitesse $O b$ pour lequel l'activité est maxima. Si l'on divise alors les valeurs du travail mécanique B par celles de l'énergie électrique dépensée E à la vitesse correspondante, ces quotients seront évidemment le rendement commercial à différentes vitesses. Ces valeurs sont réunies, à une échelle arbitraire, dans la courbe ff , qui indique que le rendement maximum est atteint à la vitesse correspondant au point c .

CHAPITRE XXVI

ÉPREUVES DES MACHINES GÉNÉRATRICES ET RÉCEPTRICES

Les épreuves à faire subir aux machines dynamos sont de deux sortes, les unes sont relatives à la conception et à la construction des machines, les autres à ce qu'elles donnent après exécution. Les premières comprennent des épreuves de résistance des diverses bobines et connexions, ainsi que d'isolement des parties actives. Les autres embrassent les épreuves de rendement sous différentes charges, et celles d'activité électrique à différentes vitesses.

La résistance des diverses parties des bobines d'armature, des bobines d'électro-aimants et des différentes connexions peut se prendre de la manière ordinaire, à l'aide du Pont de Wheatstone ou par l'une des méthodes galvanométriques connues. Le seul point délicat est la difficulté de mesurer des résistances aussi faibles que celles des armatures et des bobines en série qui ne sont souvent que de petites fractions d'ohm. Dans ce cas, la meilleure méthode à suivre paraît être la suivante. On lance à l'aide de quelques éléments d'accumulateurs un courant énergique dans l'armature ou la bobine dont on veut mesurer la résistance, en intercalant un ampère-mètre dans le circuit. Pendant le passage du courant, on mesure, à l'aide d'un volt-mètre sensible, la chute de potentiel entre les deux extrémités de la bobine. D'après la loi d'Ohm, le quotient du nombre de volts, équivalent à la chute de potentiel, par le nombre d'ampères du courant donnera la résistance en ohms. On peut arriver à une exactitude encore plus grande en insérant

dans le circuit une bande épaisse de maillechort, de résistance connue, comme l'a suggéré Lord Rayleigh, et en comparant la chute de potentiel entre les deux extrémités de la bande avec la chute de potentiel dans la bobine. Le rapport entre ces deux chutes de potentiel est égal au rapport des résistances respectives de la bobine et de la bande.

Il faut bien se garder d'oublier que la résistance interne d'une dynamo après un fonctionnement de quelques heures, est notablement plus élevée à *chaud* que sa résistance à froid. Les mesures de résistance doivent en conséquence être prises avant et après fonctionnement.

La résistance d'isolement entre les diverses parties de la machine doit être prise avec le plus grand soin et cette mesure doit être répétée de temps à autre. Ces épreuves de résistance d'isolement doivent porter notamment sur les bornes de la machine et son bâti métallique, ainsi que sur l'arbre et les lames du collecteur. Il n'y a pas de points où l'isolement soit plus susceptible de se détériorer qu'au collecteur. Il arrive souvent qu'une machine, paraissant d'ailleurs en parfait état, perd, sans qu'on sache tout d'abord pourquoi, sa puissance ordinaire d'émission de courant par suite d'un court circuit invisible qui se déclare dans les lames de matière isolante entre les segments du collecteur. Une mince couche d'huile carbonisée, souvent mélangée de petites particules métalliques détachées des balais, suffit à laisser passer le courant qui se perd ainsi au lieu d'arriver dans le circuit avec toute son intensité. Aussi est-il bon que les lames du collecteur puissent se détacher facilement des sections correspondantes de l'armature de manière à permettre les épreuves d'isolement lame par lame.

L'épreuve du rendement et de la puissance de production d'une machine, soit comme génératrice, soit comme réceptrice, est une question beaucoup plus importante qui exige à la fois des mesures électriques et dynamométriques.

Dans le cas de la dynamo considérée comme génératrice, il faut mesurer (*a*) la puissance en chevaux dépensée, et (*b*) l'activité des courants électriques développée.

Dans le cas d'une dynamo fonctionnant comme moteur et produisant du travail, il y a à mesurer (a) l'activité électrique absorbée, et (b) la puissance en chevaux développée.

Mesure de la Puissance mécanique.

Il existe quatre méthodes générales de mesurer la puissance mécanique :

(a.) *Méthode graphique.* — Consistant à prendre un diagramme d'après la machine à vapeur qui fournit la force.

(b.) *Méthode du frein.* — Consistant à absorber la force développée par la machine à l'aide d'un frein à friction tel que ceux de Prony, Poncelet, Appold, Raffard ou Froude.

(c.) *Méthode dynamométrique.* — Comportant la mesure sur un dynamomètre de transmission ou sur un erg-mètre, tels que ceux de Morin, Hefner-Alteneck, Ayrton et Perry, ou F.-J. Smith, de la puissance ou du travail mécanique réel d'un arbre ou d'une courroie.

(d.) *Méthode d'équilibre.* — Consistant à mettre en équilibre sur ses propres pivots la dynamo ou le moteur et à les faire eux-mêmes leur propre dynamomètre ou erg-mètre.

Méthode graphique. — L'opération qui consiste à prendre un diagramme indicateur du travail d'une machine à vapeur est trop connue des ingénieurs pour qu'il soit besoin de rien autre que de la mentionner en passant. Cette méthode n'est cependant pas toujours applicable; dans bien des cas, en effet, la machine à vapeur a à conduire d'autres outils et de lourdes transmissions pour ces outils. En pareil cas, il n'y a d'autre remède que de prendre deux séries de diagrammes indicateurs, l'une correspondant à l'état de fonctionnement de la machine électrique, l'autre à sa condition de repos, sa courroie étant mise à bas; on admettra que la différence représente la puissance en chevaux absorbée par ladite machine.

Méthode du frein. — Le frein à friction de Prony est bien connu des ingénieurs; mais on ne peut en dire autant des formes plus récentes de dynamomètres à friction. Plusieurs améliorations de détail ont été successivement apportées au type primitif par Pon-

celet, Appold et Deprez. Dans la méthode de Prony on mesure l'activité en serrant deux demi-colliers en bois contre une poulie montée sur l'arbre ; le couple exercé sur les deux mâchoires étant mesuré directement à l'aide de poids suspendus à l'extrémité d'un levier d'un moment suffisant pour empêcher la rotation. Si l'on appelle p le poids qui, à une distance l du centre, fait équilibre à la tendance au mouvement de rotation, la force de friction f multipliée par le rayon r de la poulie sera égal à p multiplié par l .

Ce qui peut s'écrire

$$\text{moment} = fr = pl,$$

d'où il suit que

$$f = \frac{pl}{r}.$$

Si n est le nombre de révolutions *par seconde*, $2\pi n$ est le nombre de radians par seconde, ou en d'autres termes la vitesse angulaire pour laquelle nous employons le symbole ω , et $2\pi nr$ est la vitesse angulaire à la circonférence. Or le travail par seconde ou « activité » est le produit de la force agissant à la circonférence par la vitesse à la circonférence, ou

$$w = fv = \frac{pl}{r} \cdot 2\pi nr = 2\pi nlp.$$

Si p est exprimé en kilogrammes, et l en mètres, on a, en se rappelant que 75 kilogrammètres par seconde font un cheval-vapeur,

$$\text{puissance en chevaux-vapeur absorbée} = \frac{2\pi nlp}{75};$$

si p est exprimé en grammes, et l en centimètres, il faudra diviser le produit ci-dessus par $7,5 \times 10^6$ pour le réduire en chevaux-vapeur.

Les dernières améliorations apportées au frein de Prony ont une grande importance. — Poncelet a ajouté une tige rigide à angles droits avec le levier, et attaché les poids à l'extrémité inférieure de celle-ci. — Appold a substitué aux mâchoires en bois une bande d'acier qui donne un frottement mieux réparti et a par suite une moindre tendance aux trépidations. — M. Raffard¹ a remplacé

¹ 1. Pour plus amples renseignements sur ces appareils, nous renverrons le lecteur aux sources suivantes : *Mechanics of Engineering* de Weisbach ; *Dictionary of Engineering* de Spon, article « Dynamomètre » ; *Work-measuring Machines* de Smith ; une série

ces organes par une courroie de largeur variable offrant ainsi un coefficient variable de friction, suivant la partie qui embrasse la poulie. — D'autres modifications du même genre ont été depuis apportées au dynamomètre à friction par MM. le professeur James Thomson, le professeur Unwin, Carpentier, et les professeurs Ayrton et Perry. — La friction d'une roue de turbine a été également employée comme frein dynamométrique par feu W. Froude.

Tous ces freins dynamométriques mesurant la puissance en la détruisant, on voit que, s'ils se prêtent admirablement à la mesure de la puissance fournie par un moteur, ils ne sauraient s'appliquer, si ce n'est indirectement, à la mesure de celle fournie à une machine dynamo. Il faut, pour opérer avec ces machines, une certaine expérience si l'on veut obtenir des résultats auxquels on puisse se fier; mais avec les formes plus modernes d'appareils, tels que ceux de Poncelet et Raffard, on arrive facilement à d'excellents résultats. Tout le secret consiste à maintenir les surfaces de friction bien lubrifiées, par une abondante quantité d'eau de savon.

Méthode dynamométrique. — Nous avons précédemment appelé le frein de Prony un frein dynamométrique; mais un véritable dynamomètre destiné à mesurer la force transmise ne doit pas détruire la puissance qu'il mesure. Les dynamomètres de transmission peuvent se diviser en deux catégories étroitement liées entre elles et comprenant, d'une part, ceux qui mesurent la puissance transmise par l'entremise d'une courroie, et, d'autre part, ceux qui mesurent la force transmise par l'entremise d'un arbre.

Dans le cas d'une transmission par courroie, la force réelle qui agit est la différence de tension¹ ou de traction entre les deux brins de la courroie. Si F' est la traction dans le brin lâche de la courroie avant qu'elle ne passe sur la poulie de commande, et F la traction dans le brin tendu quand elle quitte la poulie de commande, $F - F'$ représente la traction nette à la circonférence, et $(F - F') r$ est le

d'articles de M. Gisbert Kapp dans *The Electrician*, 1883-1884; *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 1877, p. 237 (M. Froude); *Rep. Brit. Assoc.*, 1883 (Prof. Unwin); *Journ. Soc. Telegr. Eng. and Electr.*, XLIX, t. XII, p. 346 (Prof. Ayrton et Perry).

1. Le mot « tension », bien qu'employé par les ingénieurs comme synonyme de « force de traction », ne doit pas être pris dans ce sens; il doit être limité à sa véritable signification de force par unité de surface de section transversale.

couple mécanique \mathcal{C} ou moment de rotation. D'ailleurs, si n est le nombre de révolutions *par seconde*, la vitesse angulaire ω est égale à $2\pi n$, et nous avons pour expression du travail par seconde ou de l'activité

$$w = \omega \mathcal{C} = fv = 2\pi nr(F - F').$$

Comme précédemment, si F et F' sont exprimés en kilogrammes et r en mètres, l'expression doit être divisée par 75, pour fournir des chevaux-vapeur; ou par $7,5 \times 10^6$ si les quantités ci-dessus sont exprimées en grammes et en centimètres.

M. von Hefner-Alteneck a imaginé un dynamomètre qui peut s'appliquer à une courroie de transmission et qui mesure effectivement la différence $F - F'$ dans les brins tendu et lâche de la courroie; ce dynamomètre est généralement connu sous le nom de dynamomètre Siemens¹. On en doit d'autres types à Sir F.-J. Bramwell, W.-P. Tatham, W. Froude, T.-A. Edison, et autres. Presque tous ces appareils introduisent des poulies additionnelles dans le système de transmission, ce qui augmente les frottements.

Les dynamomètres de transmission qui mesurent la force transmise par l'entremise d'un arbre sont beaucoup plus satisfaisants. Presque tous les appareils de cette catégorie comportent une poulie fixe clavetée sur l'arbre, et à côté d'elle une poulie folle qui lui est reliée par un système quelconque de ressort disposé de telle façon que l'allongement ou la tension du ressort mesure l'avance angulaire de l'une des poulies sur l'autre, cette avance angulaire étant proportionnelle à la force angulaire ou au couple transmis. A cette catégorie appartient le dynamomètre bien connu de Morin, dans lequel le déplacement de la poulie folle agit contre un système de ressorts relié en son milieu à l'arbre d'entraînement. L'appareil Morin a reçu diverses modifications dues à MM. Easton et Anderson, Heinrich², Ayrton et Perry³, et le Rév. F.-J. Smith. Le dynamomètre de M. Smith mérite une mention spéciale en raison

1. L'une des formes du dynamomètre Siemens a été décrite par le Dr Hopkinson. *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 1879. Schroter (*Bayerischen Industrie-und Gewerbeblatt*, 1883) en a décrit un type plus récent.

2. Voir dans *l'Engineering*, 2 mai 1884, un excellent compte rendu d'une série d'épreuves faites avec beaucoup de soin et d'habileté par MM. Alabaster, Gatehouse et C^{ie} pour le compte de M. Heinrich.

3. *Journ. Soc. Telegr. Eng. and Electr.*, t. XII, p. 163, 1883.

de sa perfection et de sa précision. — Cet instrument, dont la figure 229 donne le dessin, comporte comme les autres deux pou-

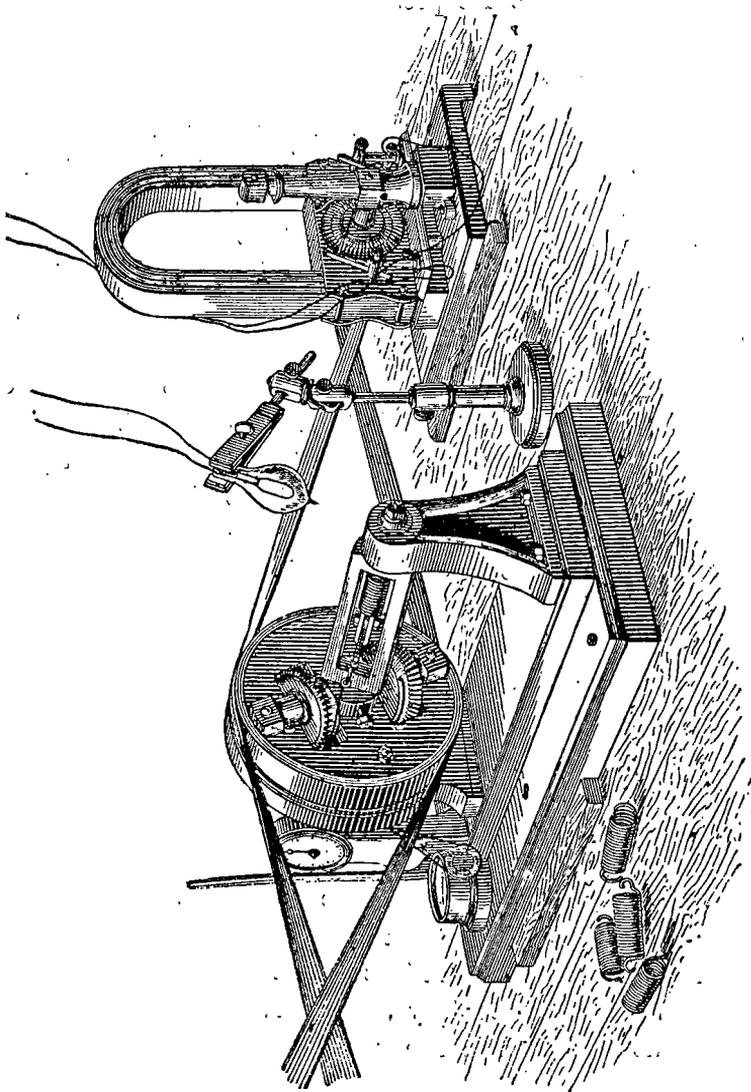


FIG. 229. — Dynamomètre de transmission de F.-J. Smith.

lies, dont l'une, celle d'avant, est clavétée sur l'arbre, et l'autre, celle d'arrière, est folle sur ce même arbre. Mais le déplacement de la poulie folle ne se mesure plus de la même façon que dans les précédents appareils. La poulie folle porte une roue d'angle (invi-

sible dans la figure) tournant entre deux autres roues d'angle dont le mouvement est nécessairement proportionnel au déplacement angulaire. Chacune de ces roues d'angle est reliée à un tambour cylindrique plat, sur lequel s'enroule un ruban d'acier ou une corde de boyau fixée à une crosse. L'arbre en acier forgé est cylindrique à ses extrémités et forme un cadre rectangulaire en son milieu; la crosse passant à travers le cadre est fixée à un ressort. Un déplacement quelconque de la poulie folle fait enrouler les rubans d'acier sur les tambours et tend le ressort. Une petite tige d'acier qui traverse l'extrémité postérieure du cadre se meut dans l'axe de l'arbre, foré à cet effet, et actionne l'aiguille d'un cadran qui fournit une lecture directe de l'effort transmis. Un compte-tours est annexé à l'instrument. M. Smith munit en outre son appareil d'un intégrateur qui enregistre d'une manière continue sur un tambour le travail effectué; la vitesse de rotation du cylindre récepteur étant dans un rapport donné avec la vitesse d'entraînement, et le déplacement du stylet enregistreur, qui trace les ordonnées, proportionnel au couple mécanique. La position du ressort dans l'axe même du dynamomètre pare à toute éventualité d'erreur par suite de déplacement dû à la force centrifuge. M. Smith a imaginé pour la lecture directe un nouveau mode d'étalonnage, qui paraît présenter des avantages sur la méthode ordinaire consistant à suspendre des poids à la poulie folle. — Supposons le dynamomètre de transmission actionné par un moteur régulier quelconque — une roue hydraulique, par exemple, qui paraît présenter le plus de fixité; — et supposons que ce dynamomètre entraîne un autre arbre sur lequel soit appliqué un frein de Prony ou d'Appold. La vitesse étant connue, la mesure du travail effectué contre la friction du frein donnera la valeur du couple mécanique transmis. — Tout dynamomètre de transmission doit être gradué de la même manière.

Méthode d'équilibre. — M. Smith a imaginé la méthode de mesure suivante qu'il a appliquée lors d'épreuves faites par lui sur quelques petits moteurs Trouvé à l'Exposition de Paris en 1881. Avec les petits moteurs on se heurte en effet à cette difficulté, que

1. Le même principe de roues d'angle ainsi actionnées a été appliqué, mais d'une façon absolument différente, dans les dynamomètres d'Hachette et de White.

l'application des moyens ordinaires à la mesure de leur puissance introduit des frottements étrangers dans une proportion relativement considérable. Pour remédier à cet inconvénient, M. Smith monte l'arbre du moteur à essayer, avec son armature, entre deux pivots, ou deux roues de friction, en équilibrant avec le plus grand soin les électro-aimants et le bâti à l'aide de poids. Dans la figure 230, B D représente les électro-aimants et le bâti du moteur dûment équilibrés ; E est l'armature. Quand on lance le courant dans l'armature, celle-ci tend à tourner dans un sens, et les électro-aimants dans l'autre ; la réaction angulaire étant naturellement égale à l'action angulaire. Si la réaction qui tend à entraîner les électro-aimants

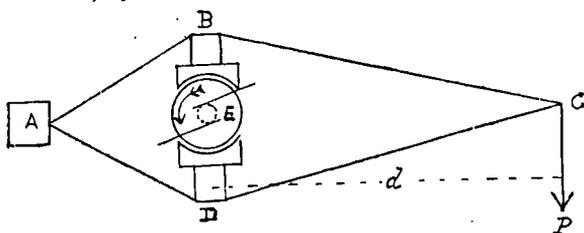


FIG. 230. — Méthode de Smith pour les épreuves des moteurs.

est balancée par l'application d'une force P (celle d'un ressort antagoniste par exemple) au point C du système $A B C D$, le moment $P d$ de cette force mesure le couple mécanique, exactement comme dans le frein de Prony. Le moteur devient ainsi, comme on le voit, son propre dynamomètre, le frottement magnétique, si l'on peut s'exprimer ainsi, entre l'armature et les électro-aimants se substituant au frottement mécanique entre la poulie et les mâchoires du frein.

Depuis, M. Deprez et le professeur C.-F. Brackett ont proposé d'appliquer cette méthode de balance dynamométrique aux machines dynamos en mouvement. M. le professeur Brackett monte la machine dans une sorte de châssis, et mesure la force de réaction angulaire ou le couple mécanique entre les inducteurs et l'induit ; en multipliant ensuite cet effort par la vitesse angulaire $2\pi n$, il obtient en chevaux-vapeur la puissance transmise à l'armature. Il peut sembler incroyable à première vue que le champ magnétique, invisible dans l'étroit espace qui sépare l'induit des pièces polaires, puisse exercer un effort aussi puissant que celui d'un frein à fric-

tion; le fait est néanmoins absolument vrai. Cet effort existe dans toutes les machines dynamos. La machine Crompton-Kapp, par exemple, décrite page 119, absorbait environ trente chevaux de force. Elle marchait à 1000 tours par minute, et le rayon de l'induit était de 10 centimètres environ. Son effort circonférentiel était par suite égal à 41,4 kilogrammètres ! Il n'y a pas à s'étonner, avec un frein aussi puissant sur l'armature, que les « bobines élémentaires » formées de baguettes de cuivre étiré de 30 millimètres carrés de section se soient trouvées, lors d'un premier essai, déplacées par suite de l'effort exercé sur elles par le champ magnétique. On n'a pu éviter le retour de cet inconvénient qu'en intercalant entre les bobines élémentaires des coins en bois, solidement maintenus en place par des frettes extérieures en fil de laiton, comme dans les bobines Siemens.

Ces diverses méthodes dynamométriques exigent toutes l'emploi d'un indicateur de vitesse pour compter le nombre de tours par seconde n qui entre comme facteur dans le calcul de la puissance en chevaux. On ne saurait prendre trop de précautions pour éviter, surtout dans l'essai des *petites* machines, d'introduire, en appliquant les compte-tours, des frottements inutiles. Une connexion souple, telle qu'un petit fragment de ressort en boudin, entre l'arbre de la machine et l'axe du vélocimètre, est un utile intermédiaire à cet effet. Le nombre de tours *par seconde* n étant connu, la vitesse angulaire $\omega = 2\pi n$ se calcule aisément. Il ne reste plus qu'à multiplier cette dernière par le couple mécanique $\mathcal{C} = Fr$ pour avoir l'activité ou le travail par seconde w . Et, si \mathcal{C} est exprimé en kilogrammètres,

$$\text{l'activité en chevaux-vapeur} = \frac{2\pi n Fr}{75} = \frac{\omega \mathcal{C}}{75}.$$

Pour plus de détails relativement aux épreuves des dynamos, nous renvoyons le lecteur familiarisé avec la langue anglaise aux sources suivantes : *Report of Committee of Franklin Institution*, 1878; *Crystal Palace Exhibition*, 1882; *Report* par le lieutenant F.-J. Sprague, commissaire des États-Unis; ainsi qu'au Discours d'inauguration du professeur W.-G. Adams dans le *Journal Soc. Electr. Engin. and Electr.*, 1884; à la Thèse de M. J.-W. Howell sur des épreuves faites au *Stevens Institute*, réimprimée en un volume sur *l'Éclairage électrique par incandescence* publié à New-York, 1883, par MM. Van Nostrand; au *Rapport officiel sur l'Exposition électrique de Munich*, 1882; enfin aux épreuves faites par MM. Heinrich et Alabaster, Gatehouse et C^{ts}, reproduites dans *l'Engineering*, 2 mai 1884.

APPENDICES

APPENDICE I

MESURE DU COEFFICIENT DE SELF-INDUCTION D'UNE BOBINE.

Cette mesure peut se prendre soit par le procédé indiqué dans l'*Électricité* de Maxwell, tome II, article 757, soit d'après la méthode de M. Joubert. La première méthode n'exige qu'un pont de Wheatstone ordinaire; mais elle n'est pas d'une grande sensibilité. Voici celle de M. Joubert: Opérant avec un courant alternatif (engendré, par exemple, par la rotation d'une bobine dans un champ magnétique) dont la période est T , on relie la bobine soumise à l'expérience en série avec un fil de résistance, cette résistance étant plutôt un peu supérieure à celle de la bobine, et l'on fait passer le courant alternatif dans le circuit ainsi constitué. Le fil en question doit être droit ou au moins doublé sur lui-même avant enroulement, de manière à être exempt de self-induction. On mesure alors, à l'aide d'un électro-dynamomètre de grande résistance ou de tout autre volt-mètre susceptible de fonctionner sur des courants alternatifs, la différence de potentiel entre les extrémités de la bobine, et entre celles du fil. Soient d et d' les déviations respectives ainsi obtenues; si R est la résistance de la bobine, et R' celle du fil, le coefficient de self-induction de la bobine est donné par la formule

$$U = \frac{T}{2\omega} \sqrt{R'^2 \frac{d}{d'} - R^2}.$$

APPENDICE II

MESURE DE L'INDUCTION MUTUELLE DE DEUX BOBINES.

Quand une bobine mobile passe devant une bobine fixe parcourue par un courant, les lignes magnétiques de celle-ci pénètrent la pre-

mière. Si les deux bobines sont parcourues par des courants, chacune d'elles tend à faire passer des lignes de force magnétiques dans l'autre. Le nombre de lignes de force que chacune d'elles émet ainsi dans l'autre, et communes par conséquent aux deux bobines, est désigné sous le nom de *mutuelle induction* des deux bobines. Il est évident que, plus les bobines sont voisines, plus leur induction mutuelle est considérable. On a coutume de spécifier cette relation en fonction d'un *coefficient d'induction mutuelle* M , qui n'est autre que le nombre de lignes de force commun aux deux bobines quand chacune d'elles est parcourue par l'unité de courant. Si les intensités des deux courants sont respectivement de i_1 et i_2 unités, l'induction mutuelle (totale) sera naturellement $M i_1 i_2$. Mais la valeur de M correspondant à un couple donné quelconque de bobines, à leur point de rapprochement extrême, sera généralement différente de celle qui correspond à tout autre couple de bobines à leur point de rapprochement extrême. Il est utile, dans certaines circonstances, de connaître la combinaison ou le couple de bobines qui présente la plus haute valeur de M . Si l'on considère, par exemple, le système inducteur d'une dynamo comme une bobine, et l'armature comme une autre bobine, la dynamo la plus puissante, toutes choses égales d'ailleurs, sera celle qui présentera le coefficient de mutuelle induction le plus élevé entre ses deux éléments.

Le seule mode pratique de mesurer le coefficient de mutuelle induction M est celui dû à Maxwell, qui donne une méthode de comparaison entre les valeurs respectives de M et de M' pour deux couples de bobines. Cette méthode, qui comporte la production de courants d'épreuve dans un circuit comprenant l'une des bobines de chaque couple, ne peut, cependant, s'appliquer au cas où les bobines ont elles-mêmes de grands coefficients de self-induction, comme lorsqu'elles ont des noyaux de fer massifs. Voici comment procède Maxwell : — Soient M le coefficient de mutuelle induction de deux bobines A et B , et M' celui de deux autres bobines C et D . Mettons les bobines A et C , reliées en série, en circuit avec une pile et une clef de contact. Relions les bobines B et D parallèlement avec un galvanomètre. Quand on établira le contact, les bobines primaires A et C induiront, dans les bobines secondaires B et D , des courants qui, si elles sont bien connectées, tendront à se neutraliser mutuellement, mais ne seront généralement pas égaux et détermineront une déviation résultante de l'aiguille du galvanomètre. Supposons maintenant qu'on augmente, au moyen de résistances additionnelles, la résistance de la bobine la plus énergique, jusqu'à ce qu'on n'obtienne plus de déviation au galvanomètre quand on abaisse la clef du circuit primaire. Si l'on désigne par r cette rési-

1. MAXWELL, *Electricity and Magnetism*, t. II, art. 755.

stance additionnelle, B et D représentant les résistances respectives des bobines correspondantes, la condition d'équilibre pour l'aiguille du galvanomètre sera

$$\frac{M}{M'} = \frac{B}{D + r},$$

ce qui donne le rapport de M à M'.

APPENDICE III

FORMULES RELATIVES AUX ÉLECTRO-AIMANTS.

On a proposé un grand nombre de formules comme expression de la force d'un électro-aimant, ou de son moment magnétique, en fonction de l'intensité du courant qui l'excite. La plupart d'entre elles sont purement empiriques. Parmi elles une seule, celle de Weber, repose sur une théorie abstraite du magnétisme; et encore ne représente-t-elle pas la réalité des faits aussi bien que certaines autres formules arbitraires. Les limites de cet ouvrage ne nous permettent qu'une courte énumération de ces diverses formules.

1. *Formule de Müller.* — Müller¹ a donné la formule

$$i = A d^{\frac{3}{2}} \operatorname{tang} \frac{m}{B d^2},$$

dans laquelle i est l'intensité du courant, d le diamètre du noyau de fer, m l'intensité du pôle produit dans le noyau, et A et B des constantes. Cette équation peut se mettre sous la forme plus pratique

$$m = B d^2 \operatorname{arc tang} \frac{i}{A d^{\frac{3}{2}}}.$$

2. *Formule de von Waltenhofen.* — La formule de Müller faisait entrer dans l'expression le diamètre du noyau. Von Waltenhofen l'a transformée de manière à la rendre applicable au cas où le poids du noyau est donné. Dans cette formule, g est le poids en grammes, et α et β sont des constantes. M est ici le moment magnétique du noyau, et x le moment magnétique de la bobine.

$$M = \beta g \operatorname{arc tang} \frac{x}{\alpha g^{\frac{3}{2}}}.$$

1. Voir *Die Lehre von der Elektrizität* de Wiedemann, t. III, p. 414; ainsi que *Lehrbuch der Physik* de Müller-Pouillet, t. III, p. 482 (édition de 1881); et *Electricity and Magnetism* de S. P. Thompson, art. 328.

Il résulte de cette équation que, quand x est infiniment grand, le moment magnétique du barreau saturé est proportionnel à son poids. Des formules analogues de la forme générale

$$M = b \operatorname{arc} \operatorname{tang} \frac{i}{a},$$

ont été employées par Dub, Cazin et Breguet; mais ce ne sont que des variantes de l'équation de Müller. Le défaut de toutes ces formules d'*arc tangente* est de se prêter fort peu à un emploi commode dans les équations des machines dynamos. Elles ne concordent pas d'ailleurs avec les observations de Lenz, de Jacobi, Scoresby, Sturgeon, et d'un grand nombre d'autres expérimentateurs, qui établissent que, pour de petites valeurs du courant d'excitation, le magnétisme développé est très exactement proportionnel à l'intensité du courant. Dans la courbe de saturation, donnée par la figure 169, page 289, la première partie de la courbe est sur un long parcours sensiblement droite, tandis que, si la loi d'*arc tangente* était vraie, cette portion de la courbe serait très franchement convexe.

3. *Formule de Weber*. — La formule de Weber¹ est basée sur l'hypothèse que dans chaque unité de volume de fer il existe n molécules ayant chacune un moment magnétique m ; de sorte que le moment magnétique de l'unité de volume (qui est numériquement égal à l'intensité du magnétisme), si toutes les molécules avaient leurs axes parallèles, serait $I = m n$. Elle suppose également que chaque molécule est placée dans une certaine direction arbitraire et tend à y rester, sous l'action d'une force coercitive moléculaire, dont il appelle D la valeur. Si la force magnétisante X agit sur une molécule sous un angle u , le moment magnétique effectif de cette molécule deviendra

$$m' = m \left(\frac{X + D \cos u}{\sqrt{D^2 + X^2 + 2 D X \cos u}} - \cos u \right).$$

Cette formule a été intégrée et développée par Weber. Maxwell l'a réduite à des formes plus simples pour des cas particuliers, suivant les valeurs relatives de X et de D . Dans ces équations, I représente le moment magnétique par unité de volume.

Quand X est *moindre* que D ,

$$I = m n \left(1 - \frac{1}{3} \frac{X}{D} \right);$$

1. *Elektrodynamische Maasbestimmungen*, p. 572, où l'on trouve aussi une courbe de saturation; voir également Maxwell, *Electricity and Magnetism* (2^e édition), t. II, p. 78, pour une discussion de la théorie de Weber.

Quand X égale D,

$$I = m n \left(1 - \frac{1}{3} \right);$$

Quand X est supérieur à D,

$$I = m n \left(1 - \frac{1}{3} \frac{D^3}{X^3} \right);$$

Quand X est infiniment grand,

$$I = m n .$$

Maxwell donne les résultats de ces formules sous forme de courbes qui ont également le défaut de ne pas concorder avec les faits observés.

4. *Formule de Frölich.* — Le Dr Frölich¹ emploie une formule d'interpolation pour représenter le moment magnétique M d'un électro-aimant en fonction de l'intensité i du courant et d'une série de constantes arbitraires, a , b , et c . Il lui a donné d'abord la forme suivante

$$M = \frac{i}{a + b i + c i^2}.$$

Trouvant ensuite le terme i^2 inutile, il a adopté la forme plus simple

$$M = \frac{i}{a + b i}.$$

b est égal ici à la réciproque de la valeur maxima de M, comme on peut le voir en donnant à i une valeur considérable quelconque.

Une formule tout à fait analogue avait été employée, trente ans auparavant, par Robinson pour exprimer la force portante des électro-aimants. MM. Fromme, Deprez, Clausius et Ayrton et Perry ont adopté des formules similaires. L'avantage de cette formule est de se prêter à une introduction facile dans d'autres équations. C'est une modification de cette formule que nous avons adoptée dans le cours de cet ouvrage, comme nous l'avons expliqué page 226, pour exprimer l'intensité du champ dû aux électro-aimants :

$$H = G \frac{\alpha Y i}{1 + \sigma Y i}.$$

G est, ainsi que nous l'avons dit, un coefficient dépendant uniquement de la forme géométrique de l'électro-aimant et de la position du point où l'on mesure H, α est le coefficient de perméabilité magnétique du noyau, σ le coefficient de saturation, et Y le nombre de spires sur la bobine.

1. Dr FRÖLICH, *Elektrotechnische Zeitschrift*, mars, avril et mai 1881.

5. *Formulé de Sohncke.* — M. le professeur Sohncke¹ a proposé en dernier lieu une formule exponentielle qui est une représentation très exacte des faits, tout en étant moins commode que la précédente :

$$M = \frac{1}{a} i \cdot \varepsilon^{-bi}$$

APPENDICE IV

SUR LES ÉQUATIONS GÉNÉRALES DES MACHINES
DYNAMO-ÉLECTRIQUES ET LA THÉORIE DE M. JOUBERT.

Les expressions fondamentales de la force électromotrice induite dans un conducteur en mouvement dans un champ magnétique ont été traitées par Maxwell² et utilisées par MM. Mascart³, Joubert⁴, Jamin et Bouty⁵ en ce qui concerne leur application aux machines dynamo-électriques. M. Joubert en particulier a développé ces équations, en faisant intervenir dans ses recherches les petites quantités communément négligées dans les expressions de première approximation, et en tenant un compte plus exact de l'influence des termes dus à la self-induction. M. W.-M. Moorsom, de l'Association Britannique, m'a d'ailleurs fait remarquer que l'expression fondamentale qui sert de base à tout le travail de M. Joubert pêche par l'omission de l'un des quatre termes primaires. L'équation fondamentale de M. Joubert est, sauf quelques changements insignifiants dans la notation pour faire concorder les symboles avec ceux adoptés dans tout le cours de cet ouvrage :

$$E = R i + U \frac{di}{dt} + \frac{dN}{dt};$$

R représentant la résistance et U le coefficient de self-induction du circuit, N le nombre de lignes de force magnétiques (ou, comme l'appelle M. Joubert, le « flux de force magnétique »), i l'intensité du courant, et E la force électromotrice à un instant quelconque.

Pour déduire des principes cette équation fondamentale, il suffit de se rappeler que le produit de la force électromotrice moyenne par l'in-

1. *Elektrotechnische Zeitschrift*, avril 1883, p. 160.

2. MAXWELL, *Electricity and Magnetism*, t. II, art. 581 et 689.

3. MASCART, *Journal de Physique*, t. VI, pp. 203 et 297.

4. JOUBERT, *Journal de Physique*, t. IX, p. 441, 1881; et t. II, seconde série, p. 293, 1883.

5. JAMIN et BOUTY, *Leçons élémentaires d'Électricité et de Magnétisme*, pp. 562 et 567.

tensité moyenne du courant donne le taux moyen de débit d'énergie, ou que

$$\left(E + \frac{dE}{2}\right) \left(i + \frac{di}{2}\right) = \frac{dW}{dt},$$

ou

$$\left(E + \frac{dE}{2}\right) \left(i + \frac{di}{2}\right) dt = dW.$$

Mais dW peut s'exprimer d'une autre façon, puisqu'il est égal à l'énergie dépensée dans le temps dt sous trois formes : 1° en production d'un courant de valeur moyenne, $i + \frac{di}{2}$, à travers la résistance R du circuit qu'il chauffe; 2° en augmentation de l'énergie intrinsèque du circuit par suite de l'accroissement de l'induction du courant sur lui-même; et 3° en augmentation de l'énergie mutuelle entre le circuit et le champ magnétique dans lequel il est placé. Ces trois modes d'absorption d'énergie sont mathématiquement exprimés dans l'équation suivante :

$$dW = R \left(i + \frac{di}{2}\right)^2 dt + \frac{U}{2} [(i + di)^2 - i^2] + d(Ni).$$

En égalant ces deux valeurs de dW , divisant par dt et développant, on obtient

$$\begin{aligned} Ei + \frac{E}{2} di + \frac{i}{2} dE + \frac{dE \cdot di}{4} &= Ri^2 + Ridi + \frac{R}{2} di^2 \\ &+ Ui \frac{di}{dt} + \frac{U}{2} di \frac{di}{dt} \\ &+ \frac{(N + dN)(i + di) - Ni}{dt}; \end{aligned}$$

et, en négligeant tous les termes du second degré ou de degrés supérieurs, il reste

$$Ei = Ri^2 + Ui \frac{di}{dt} + N \frac{di}{dt} + i \frac{dN}{dt};$$

ou, en divisant par i de part et d'autre,

$$E = Ri + U \frac{di}{dt} + \frac{N di}{i dt} + \frac{dN}{dt}.$$

On remarquera que le terme $\frac{N di}{i dt}$, négligé par M. Joubert, est une quantité de même ordre que le terme $U \frac{di}{dt}$ conservé par lui. Il faut voir

maintenant si le premier de ces deux termes, bien que de même ordre, est d'une grandeur assez inférieure à celle du second pour justifier cette omission. En adoptant pour le coefficient d'induction mutuelle entre le circuit-induit et le circuit-inducteurs le symbole M , on peut écrire, au lieu de $N \, di$, l'expression $M \, i' \, di$, dans laquelle i' est le courant dans le circuit-inducteurs. Or on peut démontrer que si l'on fait coïncider deux circuits quelconques, leur coefficient de mutuelle induction est égal au coefficient de self-induction du circuit qui a le plus petit coefficient de self-induction. Dans toutes les dynamos les circuits sont tellement voisins l'un de l'autre que M ne peut différer notablement de U (pour l'armature). De même, dans une dynamo montée en série, $i' = i$; d'où il résulte que $N \, di = U \, i \, di$ très approximativement; et, par suite, $\frac{N \, di}{i \, dt}$ est non-seulement du même ordre que $U \frac{di}{dt}$, mais il est approximativement de même grandeur, et son omission n'est nullement justifiable dans une étude complète des équations. Je suis également redevable à M. Moorsom de cette dernière observation¹.

APPENDICE V

SUR LE PRÉTENDU RETARD MAGNÉTIQUE.

On a souvent prétendu, en s'appuyant sur de hautes autorités, que le calage oblique à donner aux balais d'une machine dynamo était nécessité par une certaine lenteur dans la désaimantation de l'âme de fer de l'induit. Le pôle induit dans cette âme de fer, quand l'induit est au repos, est exactement opposé au pôle inducteur du champ magnétique. Pendant la rotation, au contraire, quand la machine fonctionne, ce pôle induit n'est pas directement opposé au pôle inducteur; on constate qu'il est un peu en avance et paraît en quelque sorte entraîné dans le mouvement. Ceux qui admettent, à tort suivant moi, et comme je pense le démontrer, l'explication ci-dessus, prétendent que le pôle induit est déplacé par suite d'un retard dans l'aimantation du fer, retard dû, suivant eux, à la lenteur avec laquelle le fer se désaimante.

1. M. Joubert, à qui nous avons communiqué cette critique de son équation fondamentale, nous prie de faire observer que la formule

$$E = R \, i + U \frac{di}{dt} + \frac{dN}{dt}$$

est exacte et qu'il n'y saurait entrer un terme de la forme $\frac{N \, di}{i \, dt}$. Le dernier terme de la valeur de dW est dN quand le circuit est traversé par l'unité de courant, et $i \, dN$, et non $d(N \, i)$ ou $i \, dN + N \, di$, quand il est traversé par le courant i . (Note du T.)

Or il est un fait avéré, c'est que la lenteur bien constatée dans l'aimantation et la désaimantation d'un électro-aimant ordinaire (à noyau de fer massif) n'est pas due à une certaine paresse dans l'aimantation même, mais à ce fait qu'il se développe dans la masse du fer des courants parasites chaque fois qu'on lance ou qu'on supprime le courant d'excitation; et que ces courants parasites s'opposent, tant qu'ils persistent, à toute modification dans l'aimantation. Si le noyau de fer est formé d'un faisceau de fils de fer fins vernissés ne permettant pas le développement de ces courants parasites, il n'y a aucune lenteur ni retard dans l'aimantation ou la désaimantation. C'est, en somme, une affaire de construction pour les bobines d'induction dans lesquelles doivent se produire des changements rapides d'aimantation.

Or, pour obvier au développement de ces courants parasites qui consomment inutilement de l'énergie, on forme les âmes d'armature de toutes les dynamos soit en fils de fer, soit en feuilles de tôle minces. S'il n'y a pas de courants parasites, il ne doit pas y avoir de retard. Le déplacement du pôle induit ne peut, en conséquence, être attribué à cette cause.

Il est bien connu d'ailleurs que le fer se désaimante plus rapidement qu'il ne s'aimante. Or, si la désaimantation ne demande pas plus de temps que l'aimantation, l'explication donnée d'un prétendu retard n'a plus aucune signification, en ce qui touche le déplacement du pôle induit.

Pour arriver à se rendre un compte plus exact du phénomène, on a fait à diverses époques un grand nombre d'expériences dont nous énumérerons rapidement les principales. L'auteur est, à cet égard, redevable à M. W.-M. Mordey d'une série de notes des plus intéressantes sur le mouvement du point neutre, notes qui sont reproduites *in extenso*, vu leur importance, dans l'Appendice VI ci-après.

L'auteur a pris un petit cylindre de fer et l'a placé entre les pôles d'un aimant. Le champ magnétique ainsi déterminé a été alors exploré avec de la limaille de fer. Il ressemblait à la figure 54, page 67.

Un mouvement de rotation rapide étant ensuite donné au cylindre à l'aide d'un dispositif multiplicateur, on ne put arriver à découvrir aucun changement dans les lignes de force, ni le moindre déplacement dans la polarité induite.

Il est d'ailleurs très important à noter que, même avec les machines construites sans fer dans l'armature, on a encore reconnu nécessaire de donner aux balais un calage en avance quand elles fonctionnent et alimentent un circuit. Or il est bien certain que, dans ce cas, le déplacement des balais n'est pas dû à un retard magnétique.

M. F.-M. Newton a fait sur une de ses machines des expériences qui n'ont pas encore été publiées jusqu'ici. Les électro-aimants étaient ex-

cités séparément par une source indépendante, et l'armature tournait à une vitesse modérée. Il plaça contre les pièces polaires un morceau de carton percé d'un trou pour laisser passer l'axe et couvrant l'une des faces de l'armature. Il projeta ensuite sur la carte de la limaille de fer qui se disposa en spectre magnétique suivant les lignes de force. Tant que le circuit était ouvert, le spectre formé par la limaille ressemblait à celui de la figure 54, page 67, le champ magnétique étant absolument droit. Mais quand le circuit était fermé, de telle sorte que l'armature fût parcourue par un courant, les lignes de limaille prenaient immédiatement des positions analogues à celles de la figure 67, page 81, les pôles induits se trouvant déplacés dans le sens du mouvement. On ne saurait montrer d'une façon plus probante que l'obliquité du calage est nécessaire, non pas par une certaine paresse du fer à la désaimantation, mais par la direction oblique de l'aimantation résultante, comme nous l'avons expliqué page 79.

Enfin, dans certaines expériences récentes, faites sur la force électromotrice induite dans les disques de fer et de cuivre mis en mouvement entre les pôles d'un aimant, M. Willoughby Smith¹ a trouvé qu'avec des disques de cuivre et d'argent il y avait un retard considérable, le point de force électromotrice maxima étant considérablement en avance sur le point opposé aux pôles inducteurs, tandis qu'avec un disque de fer il obtenait une force électromotrice beaucoup plus considérable sans constater le moindre retard.

Il est inutile de poursuivre plus loin la discussion.

APPENDICE VI

MOUVEMENT DU POINT NEUTRE.

(Note de M. W.-M. MORDEY)

Expériences sur une Machine « Victoria ».

1. — Vitesse régulière de 1100 révolutions par minute, — allure normale de la machine. Electro-aimants excités séparément. Circuit d'induit ouvert. Balais appliqués sur le collecteur comme à l'ordinaire et déplacés jusqu'à l'absence totale d'étincelles indiquant qu'ils occupaient la position neutre. Cette position n'accusait aucune obliquité des

1. WILLOUGHBY SMITH, *Volta-and Magneto-electric Induction*. Conférence faite à l'Institut Royal, le 6 juin 1884.

balais — autant du moins qu'il était possible de le constater dans ces conditions d'expérience nécessairement grossières. La largeur du balai et de la « région neutre » rendait impossible une certitude absolue de précision parfaite; mais autant qu'on put le reconnaître le calage paraissait droit. — Aucun courant recueilli.

On fit alors varier le courant d'excitation, — lentement, rapidement, graduellement, de toutes les façons possibles, entre 4 et 13,7 ampères, — le courant normal d'excitation étant de 6,4 ampères dans les conditions ordinaires de fonctionnement; — on ne put parvenir à découvrir le moindre changement dans la position du point neutre, la vitesse étant maintenue fixe à 1100 révolutions par seconde pendant toute la durée de l'expérience.

Les expériences ont été répétées avec de petits balais et un volt-mètre, toujours avec les mêmes résultats.

2. — Balais comme ci-dessus. Intensité du courant dans les électro-aimants (excités séparément) fixe à 6,4 ampères. — Aucun courant recueilli. Changements de vitesse, en plus et en moins, de 250 à 1300 révolutions par minute. Impossible de trouver aucune indication relative à un mouvement quelconque du point neutre.

3. — On déplaça alors légèrement les balais, d'abord en avant, puis en arrière, de manière à les tenir juste en dehors des points neutres et à déterminer une très faible étincelle.

Le courant d'excitation étant toujours maintenu constant, on fit varier la vitesse comme précédemment, afin de voir si le changement de vitesse rapprocherait ou éloignerait le point neutre des balais. — On ne constata aucun changement, si ce n'est une très légère augmentation d'étincelles pour des vitesses plus élevées, augmentation causée probablement *non pas* par un changement de position du point neutre, mais par l'accroissement de force électromotrice et de courant résultant de ce que le balai quittait les segments du collecteur.

4. — Expérience 3, répétée avec une vitesse constante mais en modifiant le champ magnétique. — Même résultat.

Les notes précédentes s'appliquent au cas d'une armature tournant dans un champ magnétique, mais *sans production de courant*.

Expériences avec production de courant.

5. — *Expérience. (a.)* Une machine « Victoria », construite pour 150 volts et 48 ampères, était excitée séparément par un courant constant dans les électro-aimants, et fonctionnait à sa pleine vitesse (normale) sur trois groupes égaux de lampes de 50 volts, montés *en série*.

(*b.*) L'un des groupes fut mis en court circuit, et la vitesse fut ré-

duite de manière à fournir le même courant et 100 volts à deux groupes de lampes.

(c.). Un autre groupe fut mis en court circuit, et la vitesse fut encore réduite jusqu'à ce que la machine donnât 50 volts et 48 ampères.

La position des balais fut la même dans les trois cas, et le point neutre était exactement le même dans toutes les expériences.

Caractère de l'Étincelle.

Le caractère de l'étincelle au commutateur d'une machine Brush fournit à un œil exercé une indication très précise relativement à la position correcte des balais.

Dans cette machine, les bobines qui passent au point neutre sont hors du circuit, et, si peu que les balais soient déplacés de la position qu'ils doivent occuper, les bobines qui traversent la position neutre se trouvent mises hors du circuit un peu trop tôt ou un peu trop tard, suivant le cas; il en résulte une variation dans la longueur et dans le caractère de l'étincelle.

6. — *Expérience* : Une machine Brush ordinaire n° 7 (pour 16 foyers) fut mise sur un circuit formé de bobines de résistance de dimensions convenables; le courant fut maintenu constant à 10 ampères par insertion de résistances croissant avec la vitesse; la vitesse fut portée graduellement de 160 à 1400 tours (sa vitesse normale étant de 800 tours). La différence de potentiel aux bornes passa de 90 à 1000 volts. On trouva qu'il n'y avait lieu à aucun changement dans la position des balais et que, par conséquent, le changement de vitesse ne déplaçait pas le point neutre.

7. — Quand une machine Brush fonctionne sans avoir sa charge complète de lampes, et qu'on lui fait donner son courant normal en réduisant sa vitesse, la position des balais est toujours la même. Il en est ainsi même avec une machine à 40 foyers dans toute l'étendue de sa marge de fonctionnement.

Les notes ci-dessus sont de simples notes d'expériences prises sans appareils ni précautions spéciaux; elles n'avaient d'autre but que de constater s'il y avait *pratiquement* un mouvement quelconque de la ligne neutre déterminé par la vitesse. Les conclusions qui paraissent en résulter sont les suivantes :

1. Quand il n'y a pas de courant engendré, la vitesse et l'intensité du champ magnétique sont absolument sans action sur la position du point neutre, qui est (sensiblement) la même, que l'armature soit au repos ou en mouvement.
2. Quand l'intensité du champ magnétique et le courant dans l'in-

- duit sont constants, la position de la ligne neutre est également constante; elle n'est pas affectée par la vitesse. Il en est même ainsi dans le cas où l'armature est en fonte, comme dans la machine Brush.
3. Les courants parasites ne paraissent pas avoir l'effet qu'on pourrait leur supposer.

APPENDICE VII *

PRINCIPE DE LA BOBINE SIEMENS (HEFNER-ALTENECK).

L'anneau Gramme (Pacinotti) et la bobine Siemens (von Hefner-Alteneck) constituent, ainsi que nous l'avons vu, les éléments typiques et fondamentaux de la plupart des machines dynamos aujourd'hui employées.

A ce titre, l'anneau Gramme est décrit dans tous les ouvrages d'électricité et le cliché de la figure 76 se retrouve partout. Il n'en est pas de même de la bobine Siemens, constamment citée elle aussi, mais dont la description, plus difficile, est rarement donnée. Quant au principe même de la bobine, à l'analogie qu'elle présente avec l'anneau et aux caractères essentiels qui la différencient de ce dernier, ils ne nous paraissent pas avoir été suffisamment mis en relief, et nous croyons devoir les préciser ici. Nous suivrons à cet effet le Dr O. Frölich (*Lehere von der Elektrizität und dem Magnetismus*) auquel nous empruntons en partie les éléments de cette étude.

Le défaut de l'anneau consiste, comme chacun sait, dans l'inactivité des portions internes de ses spires, qui présentent une résistance inutile, sans aucun profit au point de vue de l'induction (voir page 30).

Il était dès lors indiqué de chercher à supprimer les portions internes de l'enroulement et de répartir symétriquement l'une au-dessous de l'autre, à la surface extérieure de l'anneau, les deux branches des spires, en les maintenant toujours sur des génératrices diamétralement opposées de cette surface cylindrique. La suppression des portions internes des spires avait d'ailleurs l'avantage de laisser libre tout le vide de l'anneau, ce qui permettait d'y loger du fer. De là, la transformation de l'anneau de Pacinotti en bobine cylindrique ou armature-tambour d'Hefner-Alteneck. Sans doute, dans ces conditions, les portions de fil qui forment les calottes sphériques du cylindre ainsi constitué sont inactives; mais on peut réduire cet inconvénient en donnant au cylindre un diamètre inférieur à sa longueur, et, si la théorie indique (ainsi que nous l'avons vu p. 33) la section longitudinale carrée du cylindre

comme la forme la plus avantageuse pour l'armature, le calcul permet d'arriver à un moyen terme qui résout économiquement le problème. Il est d'ailleurs possible, dans certains cas, de diminuer la résistance des portions de spires qui recouvrent les bases du cylindre, en leur donnant une section plus grande.

Ce système prend déjà dans sa conception un caractère différent de celui de Pacinotti.

Mais, en outre, l'enroulement simple de l'anneau n'est plus immédiatement transportable sur la bobine. On voit en effet, à la seule inspection de la figure 62, que, si l'on supprime uniquement les spires internes en reliant directement l'une à l'autre les spires externes diamétralement opposées, c'est-à-dire en effectuant l'enroulement sur la surface extérieure du cylindre et amenant les deux extrémités du fil ainsi conduit à deux lames opposées du collecteur, les deux spires arrivant simultanément aux balais se trouveront mises en connexion; l'ensemble des spires sera dès lors constamment fermé sur lui-même, et les balais ne récolteront pas le moindre courant.

M. von Hefner-Alteneck a très heureusement surmonté la difficulté en effectuant l'enroulement *par couches superposées*, et c'est précisément là ce qui caractérise la bobine Siemens. La continuité du courant et son passage à travers toutes les sections de l'anneau sont bien, au fond, encore assurés par des connexions analogues à celles de l'anneau Pacinotti; mais, tandis que chaque section de l'anneau Gramme-Pacinotti peut être formée d'une seule couche de fil ou d'un nombre quelconque, plutôt impair, de couches, la bobine Siemens-Alteneck doit être *nécessairement* constituée au moins d'un nombre pair de couches ou d'un multiple pair d'un nombre pair. On voit en effet, à l'inspection des figures 20 et 22, que, pour une seule spire de fil, deux génératrices opposées du cylindre se trouvent recouvertes, tandis qu'une seule spire sur l'anneau ne recouvre qu'une génératrice de sa surface extérieure. Il en résulte que, si l'on veut, comme dans la figure 24, réunir parallèlement deux spires de la bobine, il faudra doubler, soit par superposition, soit par juxtaposition, la première spire. Dans le premier cas, les deux génératrices primitives se trouveront recouvertes chacune de deux spires; dans le second cas, quatre génératrices du cylindre seront recouvertes. Pour l'anneau, au contraire, il suffira de deux spires recouvrant chacune une seule génératrice de la surface cylindrique extérieure. Il en sera de même pour un nombre quelconque de spires par section et pour un nombre quelconque de sections. Aussi peut-on remarquer que, pour un commutateur à quatre lames, il n'y a, dans le cas de l'anneau (fig. 27), que quatre bobines élémentaires simples opposées deux à deux, au lieu de quatre faisceaux doubles, c'est-à-dire deux

couches au lieu d'une, recouvrant extérieurement la surface cylindrique de la bobine (fig. 29). — En somme, étant donnés un anneau et une bobine de n sections, quand on aura roulé $\frac{n}{2}$ sections de l'anneau, on n'aura recouvert que la moitié de l'anneau, tandis que la surface extérieure *totale* de la bobine se trouvera recouverte par le remplissage de ces $\frac{n}{2}$ sections; la garniture des $\frac{n}{2}$ autres sections complétera le revêtement simple de l'anneau et doublera le revêtement de la bobine, qui aura finalement un minimum de deux couches de fil.

La figure 231 représente cette disposition, vue de l'une des bases du cylindre, celle du côté où se trouve le collecteur. Les petits cercles extérieurs numérotés correspondent aux extrémités des fils recouvrant la surface cylindrique. La bobine est censée composée de huit sections, formées chacune d'une seule spire; chaque section comporte deux cou-

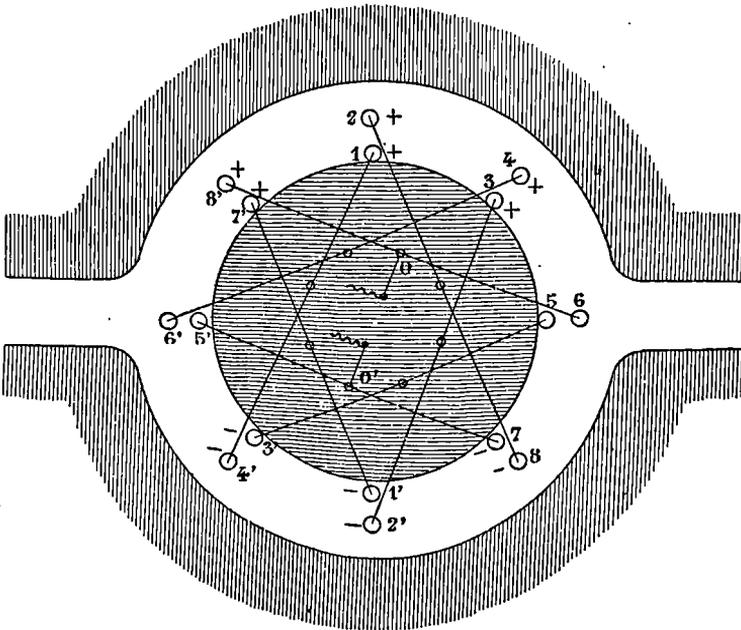


FIG. 231.

ches de fil superposées. Les cercles portant les mêmes numéros, comme 1 et 1', 2 et 2', etc... appartiennent au même fil, continu sur la base postérieure du cylindre. Ces fils sont, comme on le voit, toujours diamétralement opposés deux à deux; ils sont le siège de forces électro-

motrices égales, mais agissant en sens contraire. Si, par exemple, dans le fil 1 le courant va d'arrière en avant par rapport au plan de la figure, il va d'avant en arrière dans le fil 1'; c'est ce qu'indiquent les signes + et —; dans ces conditions, les courants s'aident mutuellement. Sur la base antérieure du cylindre, les extrémités des fils sont reliées entre elles comme l'indique la figure. Il suffit de se représenter ces fils dénudés aux points de liaison indiqués par les petits cercles intérieurs, de manière à faire, en ces points, contact avec les balais placés en $o o'$.

En partant du point o' , par exemple, et en suivant l'enroulement, on passe successivement par 7, 7', 1', 1, 4', 4, 6', 6, pour arriver en o et au second balai, puis, de là, par 8', 8; 2, 2', 3, 3', 5, 5', pour revenir au point de départ o' . Les fils forment ainsi un circuit unique revenant sur lui-même, comme dans l'anneau Gramme-Pacinotti; les courants s'ajoutent dans tous les fils; la différence de potentiel est aussi réduite que possible entre deux fils voisins; les balais occupent des positions où il ne se développe pas de force électromotrice et distantes l'une de l'autre de la moitié de l'enroulement. Cette disposition aboutit au même résultat que celle de Pacinotti; mais on voit qu'elle est essentiellement caractérisée par la connexion continue de deux couches de fil formant une double enveloppe à la carcasse.

Ce principe posé, qu'on prenne un anneau Gramme-Pacinotti, et que, au lieu de faire rentrer les spires à l'intérieur de l'anneau, on les conduise uniquement sur la surface extérieure, bases comprises, chacune d'elles enveloppant complètement et diamétralement l'anneau pour revenir à la lame du collecteur exactement voisine de celle d'où elle est partie, et l'on arrivera directement à l'enroulement Siemens-Alteneck; les portions internes des spires de l'anneau deviendront externes dans la bobine, qui finalement sera recouverte de deux couches externes, au lieu d'une.

Cette combinaison, postérieure à celle de l'anneau, offre cela de particulier que, dans l'enchaînement logique des idées, c'est elle qui se présente la première à l'esprit et sert de point de départ à la description des armatures (pp. 21 et suivantes).

E. B.

APPENDICE VIII *

FORCE ÉLECTROMOTRICE ET DIFFÉRENCE DE POTENTIEL.

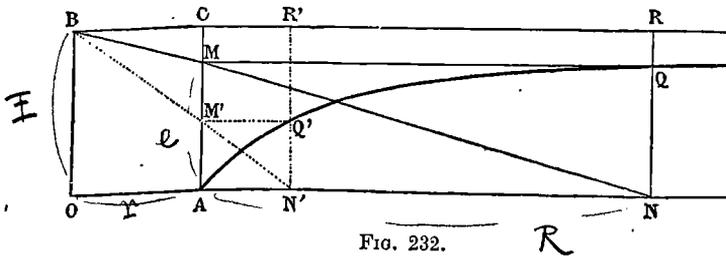
Dans le cours de cet ouvrage, et notamment à partir du Chapitre VI, l'auteur emploie concurremment et indistinctement les expressions de *force électromotrice constante*, *force électromotrice nette constante*, *poten-*

tiel constant, comme synonymes de *différence de potentiel* constante aux bornes d'une machine. Notre langage scientifique comporte en général une précision plus grande que celui des Anglais; aussi n'avons-nous pas suivi servilement l'auteur à cet égard. Si nous avons accidentellement cédé à l'entraînement, nous ne l'avons fait que par raison de style, vu la longueur de la dernière expression.

Mais, pour ne laisser place à aucune incertitude dans l'esprit du lecteur sur la valeur respective et réelle de ces expressions et pour éviter toute confusion, il nous a paru utile de reproduire ici une note très intéressante publiée par M. E. Richter dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* d'avril 1883. Cette note nous semble un des principaux éléments de la théorie géométrique des machines dynamo-électriques, et nous croyons combler une petite lacune de l'ouvrage en la donnant sous forme d'appendice.

La force électromotrice d'une machine n'est pas constante quand la différence de potentiel entre ses bornes reste constante, et inversement la différence de potentiel aux bornes ne conserve pas la même valeur quand la machine a une force électromotrice constante. Il n'y aurait parité entre ces deux éléments que pour une résistance de machine nulle ou tout au moins négligeable relativement à la résistance extérieure, condition qui ne se rencontre généralement pas dans la pratique.

Voyons donc d'abord comment varie la différence de potentiel aux



bornes pour une machine de force électromotrice constante; nous examinerons ensuite les variations de la force électromotrice pour une machine à différence de potentiel constante aux bornes.

1° Supposons une machine de *force électromotrice constante* E et de résistance intérieure r ; soient R la résistance extérieure, et e la différence de potentiel aux bornes.

Dans la figure 232, faisons $OA = r$, $OB = E$, et $AN = R$; la ligne BN représentant la chute de potentiel, on a $AM = e$. — Pour une autre valeur de R , AN' , par exemple, AM' est la nouvelle différence de poten-

lares élevées en ces points, les extrémités R, R',... de ces ordonnées détermineront une courbe qui donnera les variations de la force électromotrice pour toutes les résistances extérieures, tandis que la valeur de la différence de potentiel constante aux bornes sera représentée par la droite horizontale M Q' Q...

L'équation de la courbe de la force électromotrice est donnée par la condition

$$\frac{E - e}{r} = \frac{e}{R},$$

d'où

$$(E - e) R = e r = \text{constante},$$

qui représente encore une hyperbole équilatère ayant ici pour asymptotes les lignes A M et M Q. A mesure que la résistance extérieure augmente, la force électromotrice diminue rapidement depuis l'infini en s'approchant de plus en plus de la valeur e qui lui est asymptote.

Ces considérations sont particulièrement nécessaires à l'intelligence du fonctionnement des dynamos *compound*.

E. B.

APPENDICE IX *

DES MACHINES MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES ET ÉLECTRO-DYNAMIQUES,
PAR M. MASCART.

(*Extrait du Journal de Physique*, t. VI, juillet et octobre 1877.)

Ainsi que nous l'avons dit dans la préface de cette traduction, nous cédon's à un petit sentiment d'amour-propre national en terminant notre travail par la reproduction de la note ci-dessous. Nous avons regretté, à la lecture de l'ouvrage anglais, de ne pas y voir figurer davantage les noms de quelques-uns de nos savants les plus éminents qui ont puissamment contribué à la constitution de la théorie des machines dynamos : ceux de Gaugain, qui n'y est même pas cité, et de M. Mascart, qui n'y est prononcé qu'une seule fois sans même figurer à l'index de l'œuvre originale, n'y auraient cependant pas été déplacés. Le présent appendice a pour double objet de combler partiellement cette lacune et de rétablir, au point de vue historique et chronologique, la part contributive de chacun dans la fondation des théories électro-dynamiques.

Ce travail, *qui remonte à 1877*, est, à notre connaissance, un des premiers qui aient été publiés sur la question. Sauf l'emploi des unités pratiques aujourd'hui universellement en usage, mais qui alors n'appartenaient pas encore au langage scientifique, on remarquera qu'il y

a été apporté fort peu de modifications dans des travaux plus récents ; et, si l'on n'y trouve rien d'absolument nouveau après la lecture de cet ouvrage, on le consultera néanmoins avec intérêt comme document historique et fondamental, modestement oublié par l'auteur dans un journal scientifique malheureusement trop peu répandu.

E. B.

NOTA. — *Pour ne pas fatiguer le lecteur déjà familiarisé avec les notations de cette traduction, nous avons modifié les notations de M. Mascart, pour y substituer, autant que possible, celles adoptées dans le corps de l'ouvrage ; mais nous devons faire observer qu'elles ne conservent plus les mêmes valeurs puisque nous passons ici du système des unités pratiques à celui des unités absolues.*

1. — Les machines électro-dynamiques, et électro-magnétiques, employées soit comme moteurs, soit comme producteurs de courants, c'est-à-dire comme sources d'électricité, ont reçu de grands perfectionnements dans ces dernières années, et semblent destinées à jouer un rôle important dans l'industrie.

La théorie de ces appareils peut être établie d'une manière très simple, au moins dans ses caractères essentiels, en partant des phénomènes de l'induction électro-dynamique.

Je rappellerai d'abord la démonstration des phénomènes d'induction, déduite de la théorie mécanique de la chaleur par M. Helmholtz en 1847, et peu après par M. Thomson (*Sir W. Thomson*).

Considérons une pile quelconque dont les deux pôles sont réunis par un circuit métallique. On sait, d'après les lois de Faraday, que le poids des éléments chimiques combinés ou décomposés dans chacun des couples est proportionnel à l'intensité du courant. Ces actions chimiques sont d'ailleurs exothermiques, c'est-à-dire qu'elles dégagent de la chaleur, puisqu'elles doivent fournir le travail nécessaire à l'échauffement du circuit.

Soit Q le travail calorifique dû aux actions chimiques qui s'effectuent dans la pile entière pendant l'unité de temps, lorsque l'intensité du courant est égale à une unité électro-dynamique ; le travail produit pendant le temps dt par un courant d'intensité I_0 sera $Q I_0 dt$, en vertu de la loi de Faraday. Si R est la résistance totale du circuit en unités absolues, le travail calorifique dégagé par le passage du courant dans toute son étendue pendant le même temps est, d'après la loi de Joule, $I_0^2 R dt$. D'autre part, la force électromotrice \mathcal{E} de la pile est égale à $I_0 R$, d'après la loi d'Ohm. On a donc

$$Q I_0 dt = I_0^2 R dt = I_0 \mathcal{E} dt$$

ou

$$Q = \mathcal{E}.$$

Ainsi, la force électromotrice de la pile, en unités absolues, est égale au travail calorifique Q défini plus haut.

2. — Supposons maintenant que le circuit considéré se meuve, en tout ou en partie, sous l'influence de centres magnétiques extérieurs ou sous l'influence des réactions mutuelles de ses différentes parties. Le travail dû aux actions chimiques doit produire à la fois l'échauffement du circuit et le travail des forces électro-dynamiques ou magnétiques. Soient $w dt$ le travail mécanique accompli pendant le temps dt , et i l'intensité nouvelle du courant; on aura

$$Q i dt = i^2 R dt + w dt$$

ou

$$i R = Q - \frac{w}{i} = \mathcal{E} - \frac{w}{i}.$$

On voit donc que le courant est affaibli, si l'on considère les lois d'Ohm et de Joule comme nécessaires, c'est-à-dire la résistance du circuit comme invariable, et cette diminution indique qu'il s'est développé dans le circuit une force électromotrice E' de sens contraire à la force électromotrice primitive.

Cette force électromotrice a pour expression

$$E' = \frac{w}{i} = \frac{w dt}{i dt}. \quad (1)$$

La force électromotrice d'induction est donc égale au quotient, par l'intensité du courant, du travail accompli pendant l'unité de temps. Plus exactement, la force électromotrice d'induction est égale, à chaque instant, au quotient du travail accompli pendant un temps infiniment petit par la quantité d'électricité qui traverse le circuit pendant le même temps.

Cette équation donne en réalité toutes les lois des courants d'induction, qu'il n'y a pas lieu de développer ici. On voit aisément que les déplacements *relatifs* des différents organes interviennent seuls dans le calcul, et que le même raisonnement s'applique au cas où, le circuit étant fixe, les corps extérieurs, aimants ou courants, seraient seuls mobiles.

3. — Si un appareil ainsi disposé est employé comme machine motrice, le coefficient économique ou rendement η est égal au quotient du travail accompli $w dt$ par le travail dépensé $Q i dt$. On a donc

$$\eta = \frac{w dt}{Q i dt} = \frac{w}{i Q}$$

ou, en vertu des relations trouvées plus haut,

$$\eta = \frac{E'}{\mathcal{E}} = \frac{I_0 - i}{I_0} = 1 - \frac{i}{I_0}. \quad (2)$$

Le rendement peut donc être déterminé, soit par le rapport des forces électromotrices, soit par les intensités du courant.

Ce rendement s'approche de plus en plus de l'unité à mesure que la force électromotrice d'induction E' , laquelle augmente évidemment avec la vitesse de la machine, va en croissant. Si, dans un appareil à rotation ou à mouvements alternatifs, comme le sont nécessairement toutes les machines, on introduit un système de commutateurs convenables pour que les actions des parties fixes sur les organes mobiles soient toujours accélératrices, et si l'on supprime toutes les résistances passives, la vitesse croîtra rapidement; comme la valeur de E' ne peut pas être physiquement supérieure à la force électromotrice de la pile \mathcal{E} , elle approchera de plus en plus de cette limite. L'intensité du courant résultant i deviendra nulle et le rendement égal à l'unité; mais alors le travail lui-même sera nul.

Le travail effectué pendant l'unité de temps a pour expression

$$w = E i = i^2 R.$$

Comme on a

$$i R = \mathcal{E} - E',$$

on peut écrire

$$w = E' \frac{\mathcal{E} - E'}{R}.$$

La somme des deux facteurs E' et $\mathcal{E} - E'$ étant constante, le travail est maximum quand

$$E' = \frac{\mathcal{E}}{2}, \quad \text{ou} \quad i = \frac{I_0}{2}.$$

Le travail maximum est donc

$$w = \frac{\mathcal{E}^2}{4R} = \frac{1}{4} R I_0^2 = R i^2;$$

il correspond au cas où l'intensité du courant primitif est diminuée de moitié par les effets d'induction. Le coefficient économique ou rendement est alors

$$\eta = \frac{E'}{\mathcal{E}} = \frac{I_0 - i}{I_0} = \frac{1}{2}.$$

4. -- Le même appareil peut être employé comme producteur d'élec-

tricité, si l'on entretient le mouvement par un travail extérieur, et la force électromotrice du courant induit est donnée par la même équation (1). On peut d'ailleurs le montrer directement.

Supposons qu'un circuit fermé, entièrement composé de métaux dont toutes les soudures sont à la même température, c'est-à-dire qui ne renferme aucune force électromotrice, soit, pour une cause temporaire quelconque, parcouru par un courant d'intensité I ; déplaçons un système magnétique dans le voisinage du circuit, ou faisons mouvoir une portion du circuit lui-même, dans un sens tel que les actions qui s'exercent entre les divers organes tendent à s'opposer à ce mouvement. On dépensera ainsi un travail $W dt$ pendant le temps dt , le coefficient W étant, comme plus haut, une fonction de la vitesse de la machine et de l'intensité du courant.

Si ce travail est plus grand que celui qui correspond à l'échauffement du circuit, lequel est $I^2 R dt$, c'est-à-dire si l'on a

$$W > I^2 R,$$

le courant non seulement sera entretenu par le travail, mais il ira en croissant.

Si cette condition est satisfaite pour une intensité infiniment petite, il se produira, soit spontanément, soit par suite de la moindre perturbation électrique ou magnétique, dans un circuit primitivement à l'état neutre, un courant dont l'intensité croîtra jusqu'à ce que l'on ait

$$W = I^2 R,$$

ou, en désignant par E la force électromotrice du courant d'induction,

$$W = I^2 R = EI.$$

On en déduit

$$E = \frac{W}{I} = \frac{W dt}{I dt}, \quad (1)$$

même équation que plus haut.

Si, au contraire, le rapport $\frac{W}{I^2}$ est plus petit que R lorsque le courant est infiniment petit, l'équilibre du courant nul est stable; le travail extérieur ne peut faire naître ni maintenir aucun courant électrique, à moins que l'on n'ait d'une manière artificielle introduit pour un instant dans le circuit un courant d'intensité telle que la condition $W > I^2 R$ soit réalisée, après quoi la force électromotrice étrangère pourra être supprimée, sans que le courant cesse de se maintenir.

La force électromotrice du courant d'induction a donc la même expression lorsque la machine est employée comme moteur ou comme source d'électricité. Le rendement, dans le premier cas, étant proportionnel à la force électromotrice d'induction (2); on voit déjà que le

rendement d'une machine comme moteur doit être d'autant plus grand que cette même machine, mue par une force étrangère, donnera des courants plus énergiques.

On peut établir cette corrélation d'une manière plus étroite.

5. — Toutes choses égales d'ailleurs, le travail des forces électromagnétiques ou électro-dynamiques est proportionnel à la vitesse, c'est-à-dire, pour une machine parvenue à un régime uniforme, au nombre de tours ou au nombre des oscillations pendant l'unité de temps. La force électromotrice et l'intensité de courant ne sont pas alors des quantités absolument constantes, mais on considérera leurs valeurs moyennes correspondant au même travail calorifique.

On peut donc écrire, en désignant par N et n les nombres de tours ou d'oscillations dans les deux cas,

$$W = N H, \quad 1$$

$$w = n h.$$

Les quantités H et h ne dépendent que de la disposition de la machine et de l'intensité du courant; elles représentent le travail de la machine, positif ou négatif, qui correspond à un tour ou une oscillation.

Dans l'appareil moteur, on a

$$w = n h = E' i = \frac{E' (\mathcal{E} - E')}{R} = i R (I_0 - i),$$

$$\eta = \frac{E'}{E_0} = \frac{I_0 - i}{I_0} = 1 - \frac{i}{I_0}.$$

Quand on emploie la même machine comme source,

$$W = N H = I^2 R = I E.$$

Supposons que l'intensité du courant soit la même dans les deux cas, on aura alors

$$i = I,$$

et, par suite,

$$h = H.$$

On en déduit

$$\frac{E}{N} = \frac{E'}{n},$$

$$\frac{N}{n} = \frac{E}{E'} = \frac{I R}{R (I_0 - I)} = \frac{1}{\frac{I_0}{I} - 1}.$$

1. Les notations « H » et « N » n'ont plus ici la signification qui leur est attribuée dans le cours de l'ouvrage.

Le rapport $\frac{I_0}{I}$ peut être déterminé par le rendement de la machine motrice (2), ce qui donne

$$\frac{N}{n} = \frac{1}{\frac{1}{1-\eta} - 1} = \frac{1-\eta}{\eta} = \frac{1}{\eta} - 1.$$

On détermine ainsi, à l'aide du nombre de tours de la machine motrice et du rendement correspondant à une certaine intensité, le nombre de tours nécessaire pour obtenir la même intensité par la machine employée comme source. On voit que N est d'autant plus petit que η est plus grand : la machine est donc d'autant meilleure comme source qu'elle est plus économique comme moteur.

Si la machine fonctionne dans les conditions de travail maximum, $\eta = \frac{1}{2}$, et alors

$$N = n.$$

Ainsi la vitesse d'une machine nécessaire pour obtenir un courant d'intensité déterminée est égale à la vitesse qu'elle doit avoir pour fournir un travail maximum, ou un rendement égal à $\frac{1}{2}$, sous l'action d'une pile qui donnerait un courant d'intensité double dans la machine en repos.

6. — Considérons encore un problème dont les machines magnéto-électriques ne tarderont peut-être pas à donner une solution pratique, c'est la transmission de la force à distance. On peut y arriver aisément en accouplant deux machines.

L'une d'elles est mise en mouvement par une force étrangère, telle qu'une chute d'eau, et produit un courant électrique qui est communiqué par un fil conducteur à l'autre machine employée comme moteur.

Le travail dépensé W ou NH sur la première machine est utilisé à échauffer le fil et à vaincre les forces électriques ou magnétiques de la seconde. On a donc, en appelant I l'intensité du courant commun, R la résistance totale du circuit, et en écrivant en italiques les lettres relatives au second appareil,

$$NH = RI^2 + n\dot{h} \quad \text{ou} \quad NH - n\dot{h} = RI^2. \quad (3)$$

Le coefficient économique, dans le cas actuel, est égal au quotient

du travail produit dans la seconde machine par le travail dépensé sur la première; on a donc

$$\eta' = \frac{nh}{NH} = \frac{NH - I^2 R}{NH} = 1 - \frac{I^2 R}{NH} = 1 - \frac{I^2 R}{W}.$$

Cette expression du rendement ne dépend que de la première machine et de l'intensité du courant; mais l'intensité du courant dépend évidemment du travail effectué dans la seconde. Le rendement s'approche d'autant plus de l'unité que l'intensité est plus faible, comme dans un moteur simple: résultat facile à prévoir, puisque le seul travail perdu correspond à l'échauffement du circuit.

Supposons que le rendement soit égal à $\frac{1}{2}$, on aura alors, en mettant l'indice 1 aux termes relatifs à cette marche particulière,

$$\frac{I_1^2 R}{N_1 H_1} = \frac{1}{2},$$

$$N_1 H_1 = 2 I_1^2 R,$$

$$n_1 h_1 = I_1^2 R.$$

Comme les valeurs de H_1 et h_1 sont des fonctions de l'intensité spéciales à chaque machine, ces deux équations donneront le rapport des deux vitesses.

Si la seconde machine était maintenue au repos pendant que la première marche à la vitesse précédente, l'intensité I_2 du courant serait donnée par l'équation

$$N_1 H_2 = I_2^2 R,$$

d'où il résulte

$$\frac{2 I_1^2 R}{H_1} = \frac{I_2^2 R}{H_2} \text{ ou } \frac{2 I_1^2}{H_1} = \frac{I_2^2}{H_2}.$$

Si le travail dépensé dans la première machine est le même quand la seconde est en repos ou en mouvement avec un rendement égal à $\frac{1}{2}$, on a

$$N_3 H_3 = N_1 H_1,$$

$$I_3^2 R = 2 I_1^2 R \quad \text{ou} \quad I_3 = I_1 \sqrt{2}.$$

Le rapport de l'intensité du courant dans la première machine, quand la seconde est en repos, à l'intensité que donne le même travail, pour un rendement de $\frac{1}{2}$, est égal à $\sqrt{2}$.

Si les deux machines sont identiques, les fonctions H et h sont égales, et l'équation (3) devient

$$(N - n) H = I^2 R.$$

L'intensité du courant est donnée par la même équation que s'il n'y avait qu'une machine marchant à une vitesse égale à la différence des deux vitesses et de même résistance totale. Le rendement $\eta = \frac{nh}{NH} = \frac{n}{N}$ est alors égal au rapport des vitesses des deux machines.

7. — Ces résultats, comme on le voit, ne sont pas tout à fait les mêmes que si la première machine était remplacée par une pile ordinaire. Ainsi il n'y a pas lieu de chercher, en général, dans quelles conditions le travail utile est maximum, car ce travail a pour expression

$$nh = NH - I^2 R = NH \left(1 - \frac{I^2 R}{NH} \right) = NH \eta',$$

et il n'est pas possible de dire ce que devient cette expression si l'on ne connaît pas la fonction H . Le travail dépensé croît évidemment avec la vitesse et, comme le rendement peut être rendu supérieur à $\frac{1}{2}$, le travail utile croît lui-même avec la vitesse.

Si la vitesse de la première machine est donnée, le travail utile maximum correspond au maximum de l'expression

$$H = \frac{I^2 R}{N},$$

ce qui donne la condition, en supposant la résistance constante,

$$\frac{dH}{dI} = 2 \frac{R}{N} I.$$

8. — Supposons enfin qu'une machine, alimentée par une pile de force électromotrice \mathcal{E} , soit mise en mouvement en sens contraire de celui dans lequel le courant tend à l'entraîner. Le travail dépensé alors accroîtra l'intensité du courant, et l'on aura

$$Q i dt + n h dt = i^2 R dt,$$

ou

$$i R = \mathcal{E} + \frac{nh}{i},$$

équation qui donnera l'intensité, si l'on connaît la fonction h :

Si l'on veut, par exemple, que l'intensité soit doublée, on aura

$$n h = \mathcal{E} i,$$

$$i R = 2 \mathcal{E}.$$

La vitesse obtenue à l'aide de ces deux équations est celle dont il faudrait animer la machine pour doubler la force électromotrice de la pile employée.

9. — On peut considérer quatre types principaux de machines, qui seront caractérisés chacun par une forme particulière de l'expression du travail W , en fonction de l'intensité du courant.

1° Les machines *electro-dynamiques*, sans aimants ni fer doux, le circuit fixe et le circuit mobile étant parcourus par deux portions d'un même courant;

2° Les machines *magnétiques* (désignées dans le cours de cet ouvrage sous le nom de *machines magnétos*), formées d'aimants permanents fixes et d'un circuit mobile, ou inversement;

3° Les machines *magnéto-électriques* (aujourd'hui appelées *machines dynamos* proprement dites), formées d'électro-aimants fixes et d'électro-aimants mobiles;

4° Les machines *mixtes*, comprenant des électro-aimants et des aimants permanents, l'un des systèmes étant fixe et l'autre mobile.

10. — PREMIER TYPE : *Machines électro-dynamiques*. — Dans ce cas, la force qui s'exerce entre deux portions du circuit est proportionnelle à l'intensité du courant qui parcourt chacune d'elles, et par suite au carré de l'intensité, si le fil est unique. On peut donc écrire

$$W = N H = N C I^2.$$

La constante C dépend de la longueur et de la disposition du fil; elle représente le travail relatif à un tour ou une oscillation de la machine, pour le cas où l'intensité du courant serait égale à l'unité.

La force électromotrice d'induction de la machine employée comme moteur est

$$E' = \frac{w}{i} = n C i.$$

Comme on a $i R = \mathcal{E} - E'$, il en résulte

$$E' = \frac{n C}{R} (\mathcal{E} - E').$$

Le rendement est alors

$$\eta = \frac{E'}{\mathcal{E}} = \frac{1}{1 + \frac{R}{n C}}$$

On voit d'abord que, si l'on supprime toutes les résistances passives, la vitesse de la machine n'a pas de limite, parce qu'on ne peut avoir $E' = \mathcal{E}$, ou $\eta = 1$, que si le nombre de tours n est infini. Le rendement est indépendant de la force électromotrice de la pile employée; il augmente avec la vitesse et diminue quand la résistance du circuit va en croissant. Si l'on détermine ce rendement par expérience, on en déduira la valeur de la constante C .

Le travail maximum correspond au cas où le rendement est égal à $\frac{1}{2}$, c'est-à-dire où l'on a

$$n_0 C = R.$$

La vitesse limite n_0 , qui donne le travail maximum, est donc proportionnelle à la résistance totale du circuit. On peut écrire alors l'expression du rendement sous la forme

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{n_0}{n}},$$

qui permettra de calculer la vitesse n_0 en fonction du rendement η correspondant à une vitesse quelconque n , sans qu'il soit nécessaire de mesurer la résistance.

11. — Si une pareille machine est employée comme source ou électromoteur, la condition $\frac{N H}{I^2} > R$, nécessaire pour que le courant s'entretienne, devient ici

$$R < C N, \quad N > \frac{R}{C}.$$

Cette inégalité ne renferme pas l'intensité du courant, et la vitesse limite $\frac{R}{C}$ est égale à celle n_0 qui donne le travail maximum de la machine motrice. Tant que la vitesse de la machine sera au-dessous de cette limite, elle ne pourra maintenir aucun courant. Quand la vitesse dépasse cette limite, l'intensité du courant augmente rapidement, jusqu'à ce que l'échauffement du fil ait porté la résistance à une valeur R , assez grande pour que la condition $N C = R$ soit satisfaite. Une pareille machine devrait donc s'échauffer facilement au point de fondre tous les conducteurs; mais la constante C est en général une quantité très faible, et la vitesse limite doit être difficile à atteindre dans les expériences.

Reliée comme source à une machine motrice, celle-ci donnerait

$$\begin{aligned} N C I^2 = R I^2 + n h \quad \text{ou} \quad n h &= I^2 (N C - R) \\ &= I^2 R \left(\frac{N}{n_0} - 1 \right). \end{aligned}$$

Le rendement serait

$$\eta' = 1 - \frac{R I^2}{N C I^2} = 1 - \frac{R}{N C} = 1 - \frac{n_0}{N}.$$

Pour que le courant se maintienne, il faut encore que la condition $N > n_0$ soit satisfaite. Si le rendement est égal à $\frac{1}{2}$, on a

$$\frac{R}{N C} = \frac{1}{2} \quad \text{ou} \quad N = \frac{2 R}{C} = 2 n_0.$$

12. — DEUXIÈME TYPE : Machines magnétiques (pour nous *machines magnétos*). — Si l'on admet que le magnétisme des aimants permanents reste invariable, le travail électro-magnétique est simplement proportionnel à l'intensité du courant, et l'on peut écrire

$$w = n h = n A i^2.$$

Le coefficient A , qui dépend de la puissance des aimants et de la disposition du fil, représente le travail pour un tour ou une oscillation et une intensité de courant égale à l'unité.

La force électromotrice d'induction est

$$E' = \frac{w}{i} = n A,$$

et le rendement

$$\eta = \frac{E'}{\mathcal{E}} = \frac{n A}{\mathcal{E}}.$$

Dans le cas actuel, si la machine est débarrassée de toutes les résistances passives, la vitesse ne croît pas indéfiniment; la vitesse limite est

$$n_0 = \frac{\mathcal{E}}{A},$$

et celle qui correspond au travail maximum est

$$n = \frac{\mathcal{E}}{2 A} = \frac{n_0}{2}.$$

Le rendement est d'ailleurs proportionnel au nombre de tours et en raison inverse de la force électromotrice de la pile.

En introduisant la vitesse limite n_0 dans l'expression du rendement, il vient

$$\eta = \frac{n}{n_0}.$$

1. La notation « A » n'a plus ici le sens qui lui est attribué dans le cours de l'ouvrage.

On peut donc déterminer la vitesse n_0 par une mesure du rendement, et la constante A à l'aide de la force électromotrice de la pile employée.

13. — Si la machine fonctionne comme source, la condition

$$\frac{W}{I^2} > R \quad \text{ou} \quad \frac{NA}{I} > R$$

est toujours satisfaite pour un courant infiniment petit. L'appareil fournit donc toujours un courant, et l'équilibre est atteint quand on a l'équation

$$I = \frac{NA}{R}.$$

Cette machine se comporte donc exactement comme une pile ordinaire, et la force électromotrice est exactement proportionnelle à la vitesse.

Si le courant d'une pareille machine agit sur une autre servant de moteur, on a

$$nh = NAI - RI^2 = I(NA - RI),$$

$$\eta' = 1 - \frac{RI^2}{NAI} = 1 - \frac{RI}{NA}.$$

Pour une vitesse donnée de la première machine, le travail est maximum quand

$$NA = 2RI \quad \text{ou} \quad \frac{RI}{NA} = \frac{1}{2}.$$

Le rendement est alors égal à $\frac{1}{2}$ et l'intensité moitié moindre que si la seconde machine était en repos. L'appareil est encore exactement comparable à une pile ordinaire.

14. — TROISIÈME TYPE : *Machines magnéto-électriques* (pour nous *machines dynamos*). — Chacun des électro-aimants qui entrent dans la machine se compose d'une bobine de fil entourant un noyau de fer doux, ce qui rend l'action plus complexe. Le travail accompli est dû : 1° à l'action des fils fixes sur les fils mobiles, laquelle est proportionnelle au carré de l'intensité du courant, si le circuit est unique; 2° à l'action des fils fixes sur les noyaux aimantés mobiles et à celle des fils mobiles sur les noyaux fixes, qui sont toutes deux proportionnelles à l'intensité du courant et à l'aimantation du fer correspondante; 3° à l'action des noyaux aimantés l'un sur l'autre, laquelle est proportionnelle au produit des deux aimantations.

Supposons que l'aimantation suive la même loi dans tous les organes

et soit proportionnelle à une même fonction de l'intensité du courant. D'après la marche connue de l'aimantation du fer doux par les courants, on sait que cette fonction est d'abord proportionnelle à l'intensité pour des courants très faibles, et tend vers une limite maximum à mesure que l'intensité va en croissant. On peut donc la représenter par $M I$, le coefficient M ayant une valeur constante M_0 pour des courants faibles et tendant à devenir en raison inverse de I , soit $\frac{M_1}{I}$, pour des intensités très grandes. Les valeurs absolues de ces constantes M_0 et M_1 dépendent de la qualité du fer employé et sont proportionnelles au pouvoir inducteur magnétique du métal. L'expression du travail total peut donc s'écrire

$$W = N H = N (C I^2 + C_1 M I + C_2 M^2 I^2)$$

ou

$$W = N H = N I^2 (C + C_1 M + C_2 M^2).$$

Le terme de beaucoup le plus important est évidemment le dernier; le premier C est très petit, et il serait nul si l'un des systèmes d'électroaimants était remplacé par du fer doux, ce qui a lieu dans plusieurs moteurs électriques.

La force électromotrice d'induction de la machine employée comme moteur est

$$E' = \frac{w}{i} = n i (C + C_1 M + C_2 M^2).$$

On en déduit, à l'aide de la relation $i R = \xi - E'$,

$$\eta = \frac{E'}{\xi} = \frac{1}{1 + \frac{R}{n (C + C_1 M + C_2 M^2)}}.$$

La vitesse de la machine abandonnée à l'action de la pile, et abstraction faite des résistances passives, n'a pas de limite, puisque le courant tend alors vers zéro; le coefficient M est alors M_0 et le rendement ne peut être égal à l'unité que si $n = \infty$.

15. — Quand la machine est employée comme source, la condition $\frac{W}{I^2} > R$ est alors

$$N (C + C_1 M + C_2 M^2) > R.$$

Si le courant est très faible, cette condition devient

$$N > \frac{R}{C + C_1 M_0 + C_2 M_0^2},$$

Pour une vitesse inférieure à la limite

$$n_0 = \frac{R}{C + C_1 M_0 + C_2 M_0^2},$$

la machine ne peut maintenir un courant infiniment petit, et à plus forte raison un courant d'intensité quelconque.

Si l'on a $N > n_0$, la machine ne peut d'elle-même faire naître aucun courant, puisque la force électromotrice est d'abord nulle; mais la moindre perturbation magnétique de la machine, une trace de magnétisme rémanent dans les fers doux, ou simplement l'aimantation par la terre, suffiront à provoquer un courant initial dont l'intensité croîtra rapidement jusqu'à ce qu'on ait

$$N = \frac{R}{C + C_1 M + C_2 M^2},$$

équation qui donnera l'intensité du courant, si l'on connaît les constantes C , C_1 et C_2 , et la loi d'aimantation.

Si la valeur de N était plus grande que $\frac{R}{C}$, cette équation ne pourrait être satisfaite pour aucune valeur de C_1 , C_2 et M , qui sont des quantités essentiellement positives. Aucun mode de refroidissement, comme l'a fait remarquer M. Thomson, ne pourrait alors empêcher la fusion des fils.

Si l'on opère avec des courants faibles, le rendement de la machine motrice peut s'écrire

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R}{n(C + C_1 M_0 + C_2 M_0^2)}} = \frac{1}{1 + \frac{n_0}{N}},$$

équation qui permet de calculer la vitesse limite n_0 en fonction du rendement correspondant à une vitesse quelconque, comme pour les machines du premier type.

Si le courant d'une pareille machine est appliqué à une autre servant de moteur, on a

$$nh = I^2 [N(C + C_1 M + C_2 M^2) - R],$$

$$\eta' = 1 - \frac{R}{N(C + C_1 M + C_2 M^2)};$$

et, lorsque le courant est assez faible, ces formules deviennent encore, comme pour les machines électro-dynamiques,

$$nh = I^2 R \left(\frac{N}{n} - 1 \right),$$

$$\eta' = 1 - \frac{n_0}{N}.$$

16. — QUATRIÈME TYPE : *Machines mixtes.* — Admettons encore que le magnétisme des aimants permanents reste invariable et que celui des électro-aimants ne dépende que de l'intensité du courant. Cette seconde hypothèse revient à négliger l'aimantation du fer doux par l'influence des aimants permanents, c'est-à-dire à admettre que le travail total des aimants sur le fer doux est nul pendant une rotation ou une oscillation complète.

Le travail effectif accompli est dû : 1° à l'action des aimants sur les fils, laquelle est proportionnelle à l'intensité du courant; 2° à l'action des aimants sur les électro-aimants, qui est proportionnelle à l'aimantation par les courants. On peut donc écrire

$$W = N H_2 = N (A I + A_1 M I) = N I (A + A_1 M).$$

La force électromotrice d'induction est

$$E' = \frac{w}{i} = n (A + A_1 M).$$

La machine a encore une vitesse limite et, comme le courant tend alors vers zéro, la limite est atteinte quand on a

$$\mathcal{E} = n_0 (A + A_1 M_0).$$

Le rendement est

$$\eta = \frac{E'}{\mathcal{E}} = \frac{n (A + A_1 M)}{\mathcal{E}} = \frac{n A + A_1 M}{n_0 A + A_1 M_0}.$$

Cette machine rentre exactement dans le deuxième type, tant que l'intensité du courant est assez faible pour que le coefficient M puisse être considéré comme constant.

17. — Quand la machine est employée comme source, la condition $\frac{W}{I^2} > R$ est

$$\frac{N (A + A_1 M)}{I} > R.$$

Cette condition est toujours réalisée pour des valeurs infiniment petites de I . La machine produit donc toujours un courant, quelle que soit sa vitesse, et l'intensité est donnée par l'équation

$$I = \frac{N (A + A_1 M)}{R},$$

laquelle se réduit, si les courants sont faibles, à

$$I = \frac{N (A + A_1 M_0)}{R},$$

comme pour les machines simplement magnétiques.

Enfin, si le courant de la machine agit sur une autre employée comme moteur, on a

$$n h = N I (A + A_1 M) - R I^2,$$

$$\eta_1' = 1 - \frac{R I}{N (A + A_1 M)}.$$

Ces résultats, relativement assez simples, ne sont qu'une première approximation, et ne peuvent s'appliquer exactement aux machines réelles. Il faut tenir compte, en particulier, des réactions réciproques qui s'exercent entre les aimants et les électro-aimants, des interruptions du circuit qui ont lieu dans la plupart des appareils, et surtout du retard à l'aimantation. Cette dernière cause a d'abord pour conséquence d'exiger un déplacement des commutateurs, dans le sens du mouvement de la machine, et modifie sans doute singulièrement la loi d'aimantation.

NOTE*

SUR QUELQUES NOUVELLES FORMES DES MACHINES-TYPES GRAMME ET SIEMENS OU CONGÉNÈRES.

Au cours de la préparation de cet ouvrage, et indépendamment des innombrables imitations qui surgissent chaque jour, il s'est produit dans les machines-types, Gramme et Siemens, des modifications que l'auteur n'a pu signaler dans cette première édition.

Désireux de donner à son œuvre, du moins au point de vue français, tout le caractère de nouveauté que comporte l'époque où paraît cette traduction, et dussions-nous devancer la seconde édition du livre anglais, nous croyons devoir y ajouter la description sommaire de quelques nouvelles formes des machines les plus répandues dans notre pays.

Ces améliorations ont eu, suivant les circonstances, des objets divers. Elles portent tantôt sur la simplicité et par suite l'économie de construction des machines, tantôt sur leur légèreté quand il s'agit de moteurs locomobiles, tantôt enfin sur leurs qualités et leur efficacité mécaniques et électriques. Elles témoignent de l'incessante préoccupation des inventeurs de perfectionner leurs découvertes et d'en approprier les instruments aux besoins chaque jour plus multiples de l'industrie.

Conformément à l'ordre adopté dans cet ouvrage, nous commencerons par la machine Gramme, en remerciant M Hippolyte Fontaine des clichés et documents qu'il a bien voulu nous fournir à cet effet et qui ont servi de base à l'exposition suivante en ce qui concerne les machines Gramme.

MACHINES GRAMME. — Comme *simplicité* de construction, nous trouvons tout d'abord la machine à électro-aimants verticaux représentée par la figure 234 et spécialement employée dans la fabrication des fils dorés et argentés, ainsi que dans quelques installations d'éclairage.

Elle est formée, comme on le voit, de quatre pièces de fonte seule-

ment, assemblées par quatre boulons et constituant toute sa carcasse, bâti, noyaux d'électro-aimants et pièces polaires. Il est difficile en effet de concevoir une construction plus élémentaire; mais la simplicité paraît acquise ici au détriment de la légèreté, en raison de l'emploi exclusif de la fonte dont la perméabilité magnétique, bien inférieure à

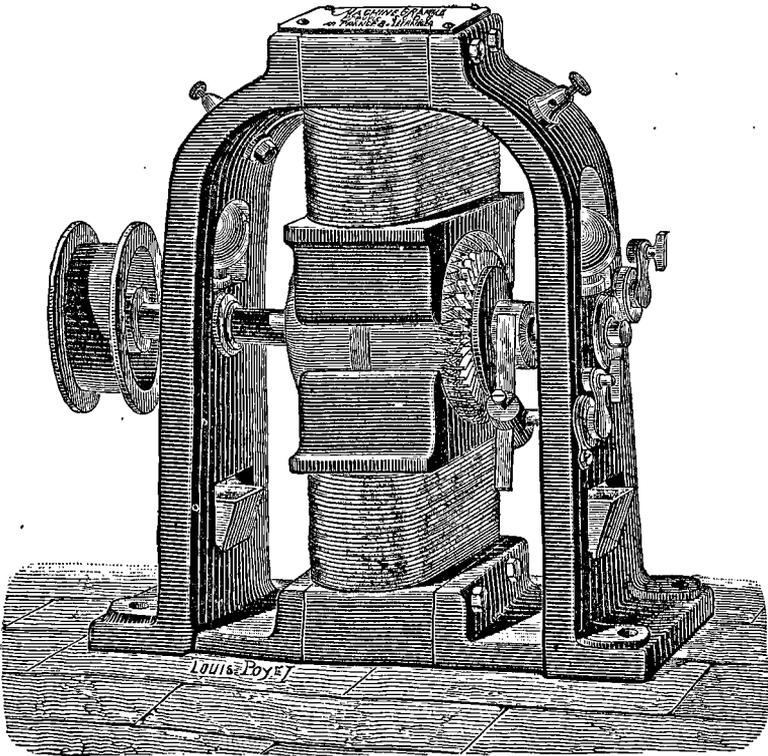


FIG. 234. — Machine Gramme à électro-aimants verticaux.

celle du fer, oblige à donner aux noyaux d'électros et pièces polaires un développement beaucoup plus considérable destiné sans aucun doute à compenser, au moins partiellement, cet inconvénient. — Ce type de machine est celui qu'a employé M. Marcel Deprez pour son transport de force à l'Exposition d'Électricité en 1881.

La même *simplicité* de construction se rencontre dans la machine dite « type de 1885 » (fig. 235), que l'inventeur a établie en vue des applications rustiques et économiques. Le bâti, les noyaux d'électro-aimants et l'un des supports de l'arbre sont venus d'une seule pièce de fonte. Une traverse, servant de second support à l'arbre, est fixée, par

deux vis, de sorte que l'ensemble des organes fixes, non électriques, ne comporte que deux pièces principales. C'est la première fois, à notre connaissance, que les noyaux d'électros sont venus de fonte avec le bâti. La garniture de fil de ces électros est roulée séparément sur un mandrin spécial ayant les dimensions exactes des noyaux qui doivent la recevoir; elle est ensuite montée d'un seul bloc et maintenue par des goupilles disposées à cet effet.

Ces machines se construisent à deux ou à quatre pôles, le plus sou-

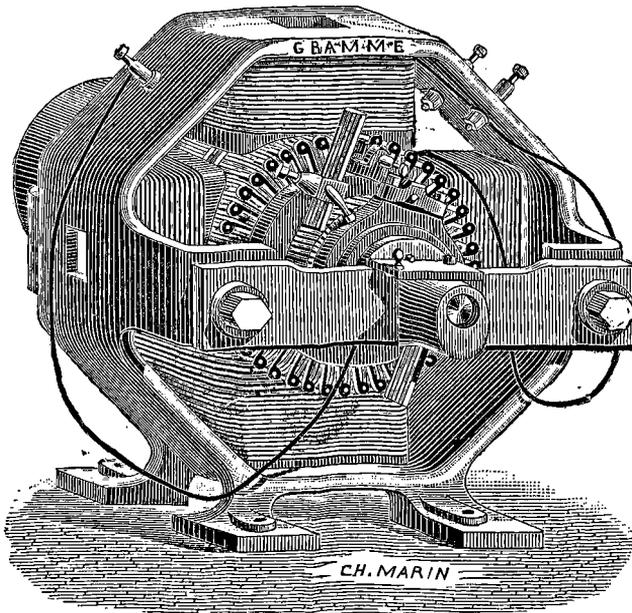


FIG. 235. — Machine Gramme (type 1885).

vent à deux pôles. Elles ont, dit-on, un coefficient économique élevé eu égard au poids de cuivre mis en œuvre. Ici encore la grande quantité de fonte dans les noyaux compense sans doute, au moins en partie, la faible capacité magnétique du métal. Cette forme de carcasse enveloppante protège les machines contre les chocs qui peuvent survenir soit dans les transports, soit pendant leur fonctionnement.

Pour les machines à grand débit, M. Gramme a adopté la disposition indiquée par la figure 236 qui rappelle beaucoup un ancien type créé par lui en 1873. Les électro-aimants verticaux y sont très multipliés, ce qui ne nous paraît pas une qualité; on en compte jusqu'à 14 dans certaines machines affectées à des éclairages importants; leurs noyaux

assemblés entre deux plateaux de fonte portent en leur milieu un encadrement de bronze qui sert de support à l'arbre central. Ces dernières grandes machines, n'ayant à proprement parler ni flasques ni bâti,

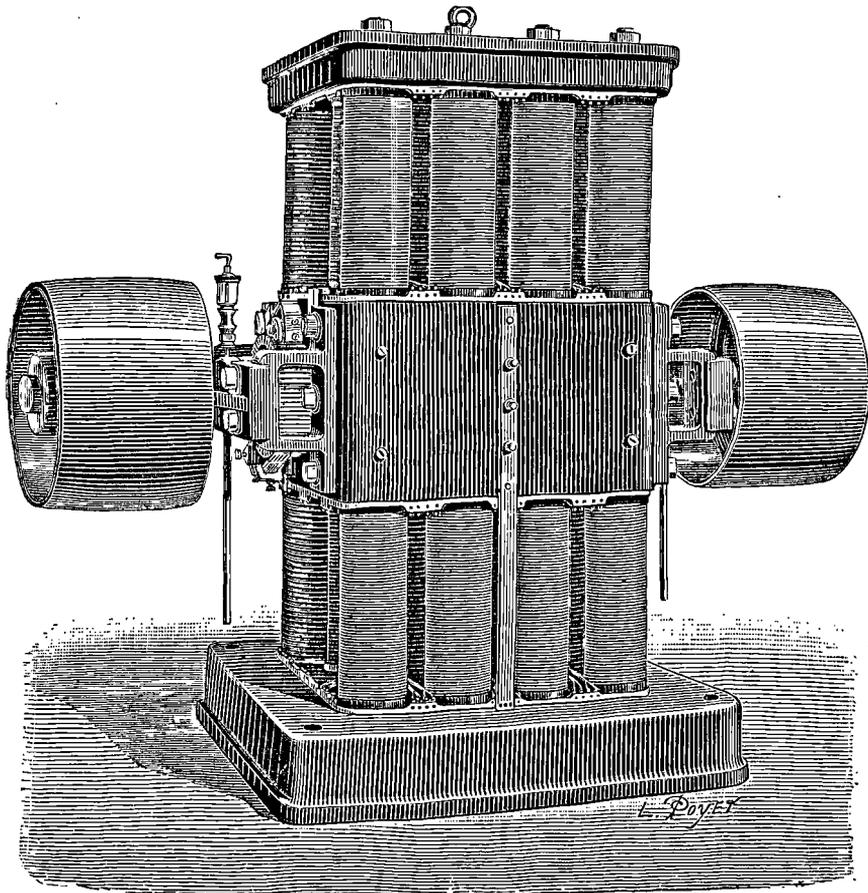


FIG. 236. — Machine Gramme à grand débit.

mesurent 1^m,63 de long, sur 0^m,93 de large, et 1^m,36 de haut; leur poids est de 3 000 kilogrammes environ.

La partie la plus intéressante de ce type de machine est son armature représentée séparément (fig. 237). Elle sort, comme on le voit, du type de l'anneau Gramme ordinaire et a reçu la forme allongée précédemment décrite (pages 114 et suivantes); elle présente d'ailleurs une grande analogie avec celle indiquée page 115 sous le nom d'armature Cabella. Dans le modèle de machine dont nous avons donné ci-dessus

les dimensions, l'anneau ou cylindre creux est constitué par 100 lames de cuivre en forme de coin recouvertes chacune d'enveloppes isolantes en carton bitumé, puis assemblées en un seul faisceau cylindrique. Sur chacune de ces lames et à $0^m,075$ de leurs extrémités sont fixées perpendiculairement des rais de cuivre qui, vus de champ, forment deux étoiles séparant l'anneau proprement dit des collecteurs également au nombre de deux. L'espace libre entre ces deux étoiles est rempli de fer doux, préalablement isolé au vernis et enroulé, comme dans la bobine Siemens, perpendiculairement aux génératrices du cylindre. L'anneau magnétique ainsi constitué est revêtu longitudinalement de 100 nouvelles lames de cuivre, de section trapézoïdale comme les premières et ayant $0^m,150$ de longueur de moins que celles-ci. Les

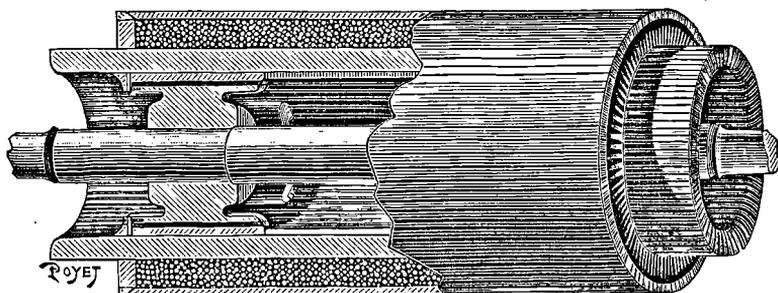


FIG. 237. — Armature de la machine Gramme à grand débit.

extrémités de ces lames, qui forment la partie active de l'anneau, sont reliées aux rais en cuivre de manière à assurer l'unité et la continuité du circuit autour de l'âme de fer. Ces lames sont naturellement isolées l'une de l'autre aussi bien que de l'anneau de fer qu'elles enveloppent.

Ainsi constitué, l'induit est fixé sur l'arbre au moyen de manchons en bronze, clavetés d'une part avec lui et reliés de l'autre à la portion interne de l'anneau; à cet effet un certain nombre de barres plus épaisses que les autres sont réservées dans le premier faisceau annulaire et viennent s'engager dans des rainures pratiquées à la périphérie des manchons de bronze en question.

Les balais, au nombre de quatre (deux de chaque côté de l'anneau), sont reliés aux deux bornes de prise de courant et aux électro-aimants montés en dérivation sur l'armature.

Ce mode de construction nous paraît présenter un grave inconvénient en ce que, les collecteurs étant constitués par les barres mêmes de l'armature, on ne peut les remplacer sans démonter complètement l'anneau; mais la multiplicité des sections et le dédoublement du collecteur en rendent, dit-on, l'usure inappréciable.

La résistance intérieure de l'induit est de $0,008$ ohm environ, et la

machine peut fournir, à la vitesse de 1 000 tours, 280 ampères utilisables sous une différence de potentiel de 100 volts.

Comme *moteur* électrique, aussi bien que pour les petites installations d'éclairage, M. Gramme a créé un type spécial représenté figure 238. Cette machine, généralement désignée sous le nom de « machine cylindrique », est formée d'un flasque circulaire en fonte, à

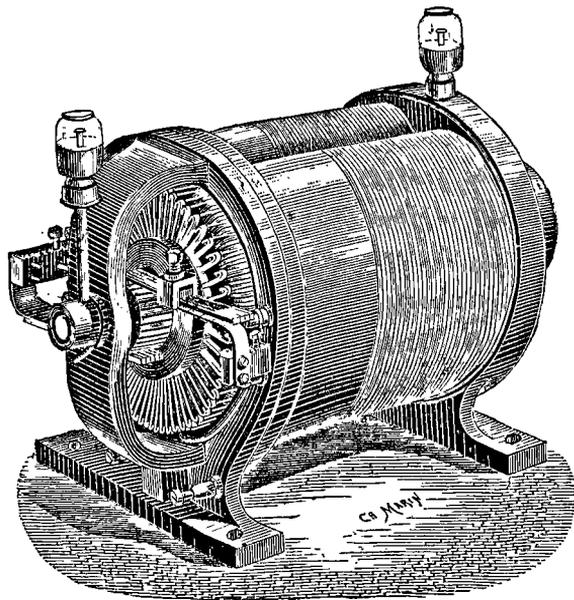


FIG. 238. — Machine Gramme cylindrique.

patin, muni d'une traverse dans laquelle vient s'engager, avec son coussinet, l'une des extrémités de l'arbre (côté de la poulie); sur cette flasque, et normalement à son plan, sont fixés, au moyen de vis, deux noyaux d'électro-aimants dont la section droite affecte la forme d'un D et dont la juxtaposition sur plats donne à la machine la forme cylindrique d'où elle tire son nom. Ces électro-aimants sont reliés à leur autre extrémité (côté du collecteur) par une seconde flasque, en bronze, analogue à la première et munie d'une traverse porte-tourillon qui sert de second support à l'arbre. Contrairement aux dispositions adoptées dans les autres machines du même inventeur où l'arbre est monté transversalement par rapport aux noyaux des électro-aimants, les génératrices de l'anneau sont ici parallèles à celles des électro-aimants. Cette machine se distingue par une autre particularité, c'est qu'elle est à pôles simples au lieu d'être à pôles conséquents.

Parmi les divers modèles de ce genre de machines, un des plus

répandus est le petit type de trois-quarts de cheval applicable aux ventilateurs et autres engins analogues.

Nous donnons ci-dessous, à titre de renseignement, le résultat d'une expérience faite sur un de ces moteurs dont l'anneau était garni de fil d'un millimètre de diamètre :

COURANT (en ampères)	DIFFÉRENCE de potentiel aux bornes (en volts)	NOMBRE de tours par minute	ACTIVITÉ ÉLECTRIQUE en kilogrammètres par seconde $\frac{Ei}{g}$	FORCE MÉCANIQUE recueillie en kilogrammètres par seconde.	RENDEMENT du moteur.
<i>i.</i>	E.	<i>n.</i>			
6.2	77.5	1820	48.0	24.0	0.500
7.4	80.0	1681	59.0	33.0	0.559
7.8	82.8	1683	64.6	37.0	0.579
7.3	83.5	1771	60.9	34.0	0.550
8.1	83.5	1640	67.6	39.0	0.557
6.34	84.0	1966	62.9	29.0	0.548
6.57	84.0	1900	53.0	30.0	0.545
5.84	84.0	2094	49.0	24.0	0.490

Au point de vue de la *légèreté*, M. Gramme a été conduit à établir un petit moteur multipolaire avec lequel ont été faites les expériences préliminaires sur la direction des ballons, à Meudon. Cette machine susceptible de prendre une très grande vitesse ne pesait que 10, 4 kilogrammes et a pu développer jusqu'à 40 kilogrammètres par seconde, c'est-à-dire plus de 4 kilogrammètres par seconde pour 1 kilogramme de matières employées.

COURANT (en ampères)	DIFFÉRENCE de potentiel aux bornes (en volts)	NOMBRE de tours par minute	ACTIVITÉ ÉLECTRIQUE en kilogrammètres par seconde $\frac{Ei}{g}$	FORCE MÉCANIQUE recueillie en kilogrammètres par seconde.	RENDEMENT du moteur.
<i>i.</i>	E.	<i>n.</i>			
11.7	45.3	4658	54.1	22.55	0.417
12.2	42.0	4463	52.3	21.63	0.413
13.0	50.0	4804	66.3	34.40	0.518
14.1	38.0	3426	54.7	32.40	0.592
16.1	35.3	2592	58.0	36.90	0.637
16.5	36.9	2610	62.3	36.90	0.592
16.9	36.0	2526	62.1	36.00	0.580
16.9	47.8	3343	82.5	47.50	0.576

Le tableau ci-dessus donne le résultat d'épreuves faites par le capitaine Renard le 28 juillet 1883 sur la machine en question. Aucun document officiel sur ces essais n'a fait connaître les motifs de l'abandon de ce moteur dans les expériences définitives, ni la machine qui lui a été substituée¹.

Comme on le voit par les chiffres de la dernière colonne des tableaux ci-dessus, le coefficient économique de ces divers petits moteurs est relativement peu élevé : à une seule exception près, il n'atteint pas 60 p. 100 de l'activité électrique du moteur, ce qui réduirait à un chiffre assez faible le rendement utile et commercial dans un transport de force à distance. Nous trouvons ici la confirmation de ce qui a été dit dans le cours de cet ouvrage (pages 218 et suivantes) en ce qui concerne les dimensions et la puissance relatives d'une machine dynamo-électrique quelconque.

Pour des transports de force plus importants, la machine employée par M. Gramme est toujours celle dite « machine octogonale », représentée par la figure 239 et qui n'est autre que la vue en perspective du moteur schématiquement indiqué dans les figures 216 et 217, pages 366 et 367 de cet ouvrage. Cette machine très rustique et spécialement destinée aux mines diffère peu d'ailleurs, du moins dans sa construction extérieure, de l'une des précédentes (fig. 235). Le cadre servant de bâti est en fonte; mais ici les noyaux d'électro-aimants sont en fer doux. Ces électro-aimants, quoique au nombre de 8, sont roulés et connectés entre eux de manière à constituer deux à deux des pôles consécutifs correspondant à quatre pièces polaires; les balais sont au nombre de quatre; l'anneau a ses génératrices perpendiculaires à celles des électro-aimants.

Les organes essentiels sont, comme on le voit, protégés le mieux possible contre les chocs auxquels ils peuvent être exposés dans un service minier.

Au point de vue électrique, ces machines sont établies sur les bases suivantes :

Diamètre du fil de l'induit	1,8 millimètre.
Résistance de l'induit	0,65 ohm.
» des inducteurs	0,95 »
» totale	1,60 »
Courant utilisable	25, » ampères.
Différence de potentiel aux bornes à 1000 tours	290, » volts.
» » » à 1300 tours	405, » »

1. Nous croyons savoir cependant que le capitaine Krebs a cherché à améliorer le rendement du moteur en excitant l'anneau par l'intérieur comme par l'extérieur à l'aide d'électro-aimants rentrant et agissant sur la portion ordinairement inactive de ses spires; mais un vice de construction l'aurait mis hors de service et en aurait fait remettre l'étude à M. Gramme.

Des expériences, faites sur cette machine aux Mines de la Péronnière et dans lesquelles, la génératrice et la réceptrice étant identiques et situées l'une près des machines à vapeur à la surface du sol, l'autre au fond de la mine près du treuil, on a relevé très exactement toutes les données mécaniques, ont fourni comme rendement commercial utile, c'est-à-dire comme rapport entre le travail initial de la vapeur et

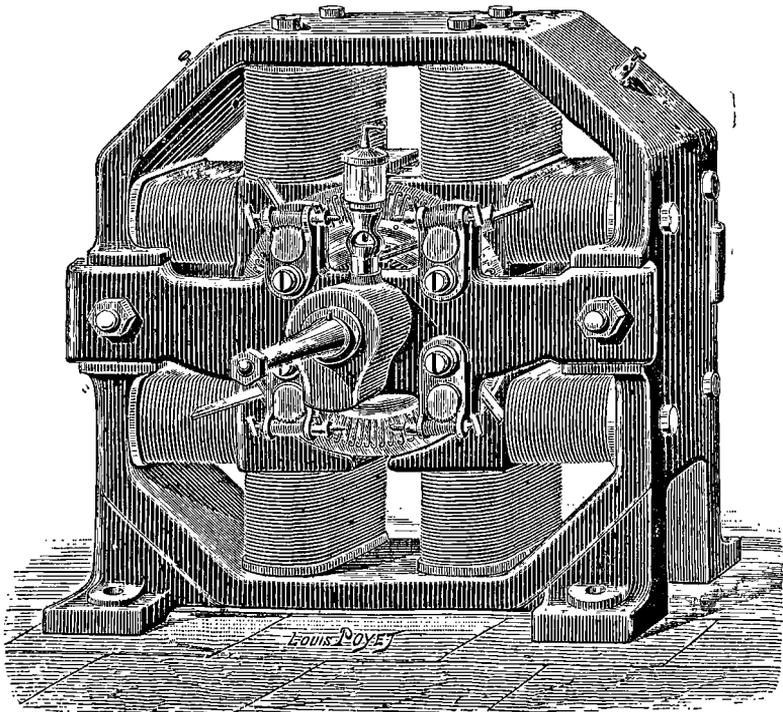


FIG. 239. — Machine Gramme octogonale.

le travail mécanique recueilli, des résultats variant, suivant la charge de la réceptrice, entre 10 et 36 1/2 p. 100; le meilleur rendement correspondait au maximum de charge et au maximum de vitesse. En tenant compte du travail absorbé par les transmissions, le rapport entre le travail mécanique réellement absorbé par la machine génératrice et le travail recueilli sur la réceptrice a oscillé entre 17, 25 et 56 p. 100 suivant les conditions de l'expérience. Quant au coefficient économique ou rendement propre des machines, il n'a été calculé que d'après le rapport des vitesses (ce qui n'est pas suffisamment exact, ainsi que nous l'avons vu) et n'a jamais été trouvé, dans ces conditions, supérieur à 67,7 p. 100.

Comme machine à courants alternatifs, M. Gramme s'est, après de nombreux essais, définitivement arrêté à son ancien modèle représenté par la figure 240. Cette machine est auto-excitatrice; à cet effet, à côté d'un appareil analogue à celui décrit page 174 et schématiquement indiqué dans la figure 130, est monté sur le même arbre un anneau

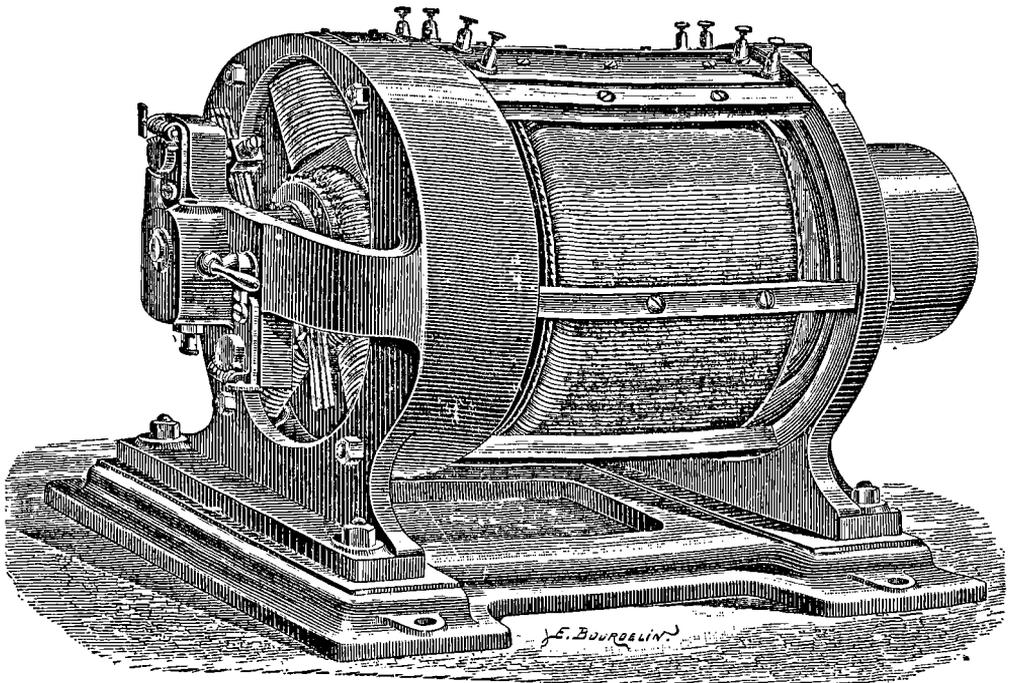


FIG. 240. — Machine Gramme à courants alternatifs.

ordinaire tournant entre les pôles de quatre électro-aimants disposés en croix de Saint-André et que l'on distingue en perspective sur la face antérieure de la figure. Elle a été construite en vue de l'alimentation des Bougies Jablochkoff.

Ainsi qu'on peut le voir d'après les descriptions sommaires et les figures ci-dessus, des considérations d'ordre physique et en quelque sorte extérieur paraissent avoir surtout présidé aux modifications que nous avons signalées. Au point de vue électrique une seule nous frappe, c'est la tendance très marquée de l'inventeur à remplacer ses électro-aimants primitivement ronds par des formes plus aplaties, d'accord en cela avec les indications théoriques données par l'auteur de cet ouvrage page 37.

MACHINES SIEMENS. — Les nouveaux types de machines construits aujourd'hui par cette maison paraissent être le résultat d'études d'un ordre plus élevé. Ils se signalent à première vue par le poids, beaucoup plus considérable, donné aux noyaux des électro-aimants comparativement au fer de l'armature; d'où, comme conséquence, les formes beau-

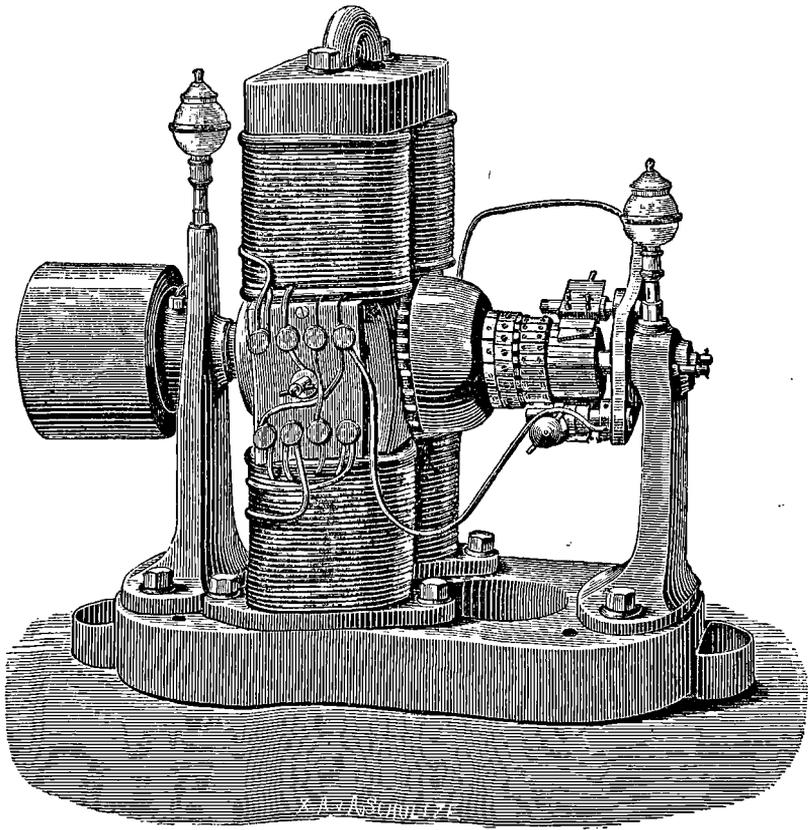


FIG. 241. — Machine Siemens « F. 17 ».

coup plus ramassées de ces nouvelles machines par rapport aux formes primitives. Il suffit, pour s'en rendre compte, de jeter les yeux sur les figures 98 et 241. Cette modification, en même temps qu'elle donne aux machines une stabilité mécanique plus grande, doit, ainsi que nous l'avons vu dans le cours de cet ouvrage, assurer également dans une large mesure la stabilité du courant, en raison de la prépondérance du magnétisme du système inducteur sur l'aimantation de l'induit.

Ce nouveau type de machines est caractérisé par la lettre « F ». Il

se construit sur un grand nombre de modèles, de puissance et de destination différentes, à en juger par les numéros que portent les machines ici représentées, « F. 17 » (fig. 241) et « F. 34 » (fig. 242).

Outre l'importance donnée ici aux électro-aimants, nous remarquons au point de vue mécanique la grande largeur donnée au socle

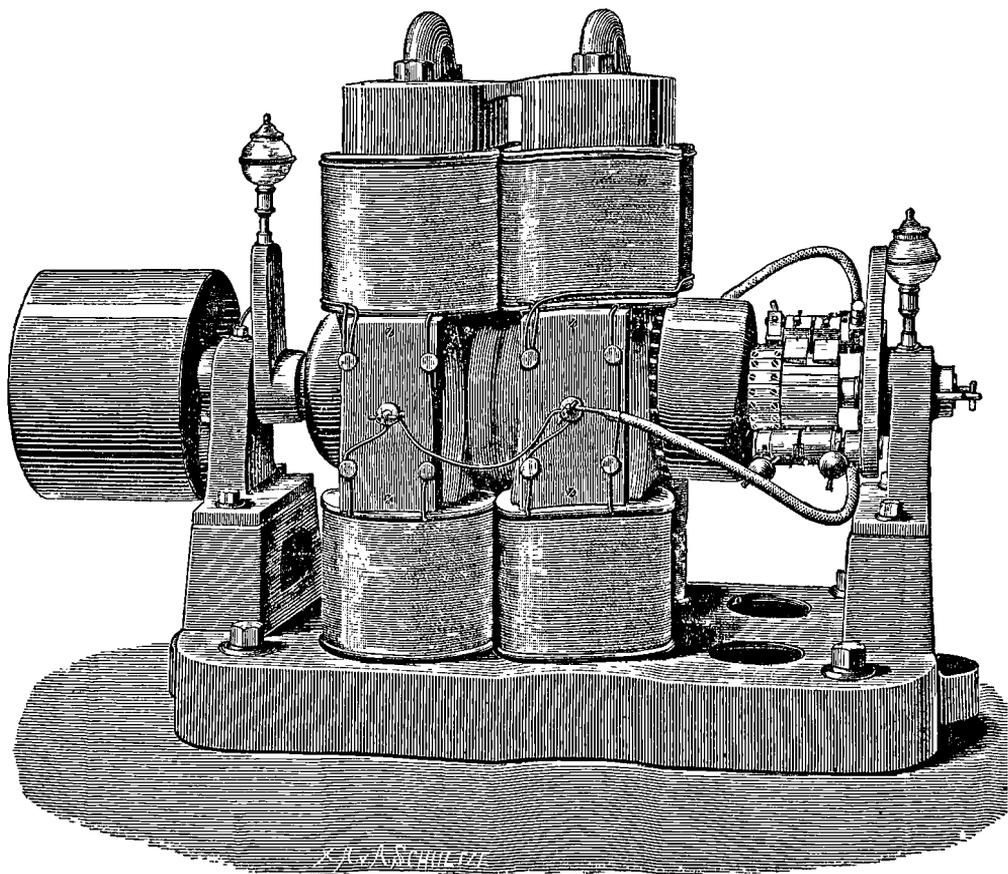


FIG. 242. — Machine Siemens « F. 34 ».

de la machine. La stabilité de la machine s'en trouve notablement accrue sans qu'il en résulte un poids trop considérable, par suite des évidements qui y sont ménagés. Les poulies ont également reçu des dimensions beaucoup plus grandes indispensables à la bonne adhérence des courroies. On sent, à la seule inspection de la figure, que ces machines sont appelées à effectuer, quel qu'en soit le modèle, un travail relativement considérable.

Les collecteurs, d'une conception et d'une construction tout à fait nouvelles, sont, chaque fois que le nombre des sections le permet, isolés à l'air. — Le serrage des balais est réglable à volonté, et ces balais ont, du moins dans le modèle « F. 17 » (fig. 241), une coupe oblique à leur extrémité collectrice. Cette obliquité paraît avoir pour but de maintenir *constamment* les balais en contact avec au moins une lame du collecteur.

Une des particularités de ces machines réside dans les tables de connexions fixées de chaque côté des flancs des inducteurs. Ces tablettes reçoivent à des bornes distinctes les extrémités de *tous* les fils d'inducteurs et d'induit constituant le système électro-magnétique. Elles permettent d'en coupler à volonté les divers éléments suivant le genre et la nature du travail demandé à la machine.

Enfin, et nous avons tenu à terminer par là la description sommaire de ces machines, il est un contraste très frappant entre ce nouveau type et la majeure partie sinon la totalité des machines décrites dans ce livre; nous voulons parler des pièces polaires. Non seulement elles embrassent très peu la bobine; mais, à l'encontre des recommandations faites par l'auteur qui préconise des pièces polaires fortes et pesantes, elles sont ici constituées par un amincissement très notable des noyaux des électro-aimants, parfaitement visible dans les figures. Il y a là un parti pris évident dont répond le nom que portent ces machines; nous sommes très désireux d'en connaître le principe.

Nous regrettons de ne pouvoir fournir quelques données sur la puissance et le rendement de ces nouveaux types; nous savons seulement qu'ils sont employés avec grand succès tant pour l'éclairage à arc et par incandescence que pour le transport de l'énergie.

La maison Siemens a également donné dans ces derniers temps un grand développement aux machines dites « à barres » (type B) spécialement destinées aux grands débits pour éclairage [par incandescence ou autres applications.

Comme l'indique leur nom, les bobines de ces machines sont constituées par des barres de cuivre au lieu de fil; ces barres ont une section trapézoïdale qui permet leur assemblage en un faisceau cylindrique. Elles ne sont isolées l'une de l'autre que par un espace libre laissé entre elles, avantage très précieux au point de vue de leur aération. Cette disposition évite mieux qu'aucune autre l'inconvénient de l'échauffement signalé page 152. Dans certaines machines on a même poussé les précautions prises à cet égard jusqu'à pratiquer sur les quatre faces des barres des entailles ou encoches tout à fait analogues à celles d'une râpe à bois, de manière à augmenter encore la surface de refroidissement.

Comme construction de bobine centrale, ces machines rappellent

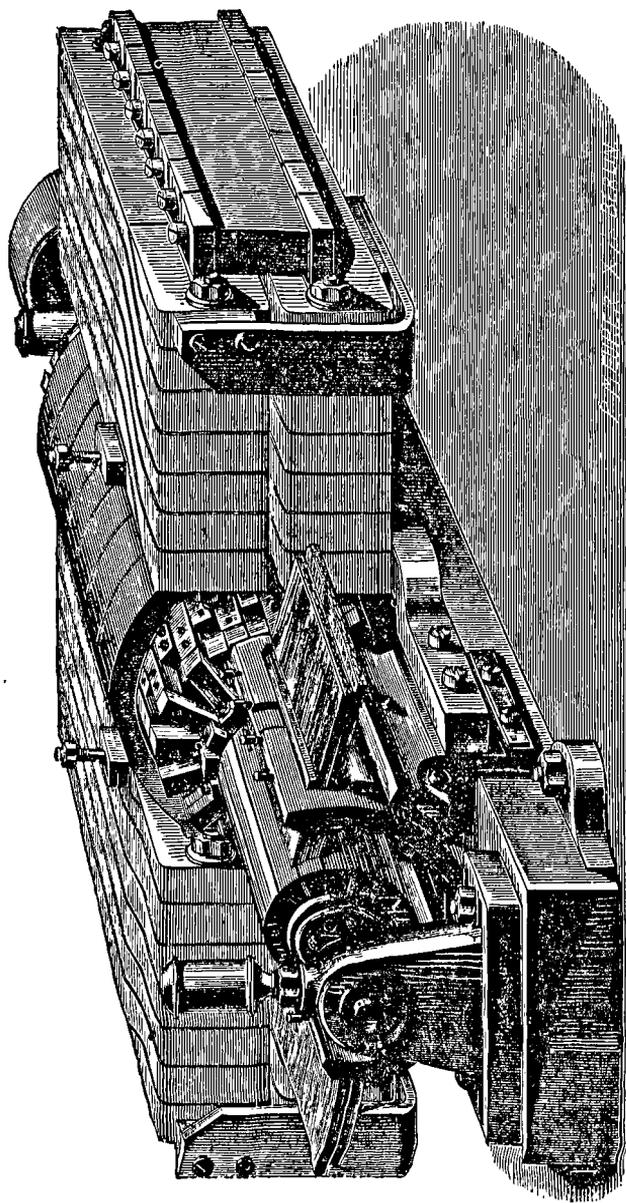


Fig. 243. — Machine Siemens « C » pour électro-metallurgie.

DES MACHINES GRAMME ET SIEMENS OU CONGÈNÈRES

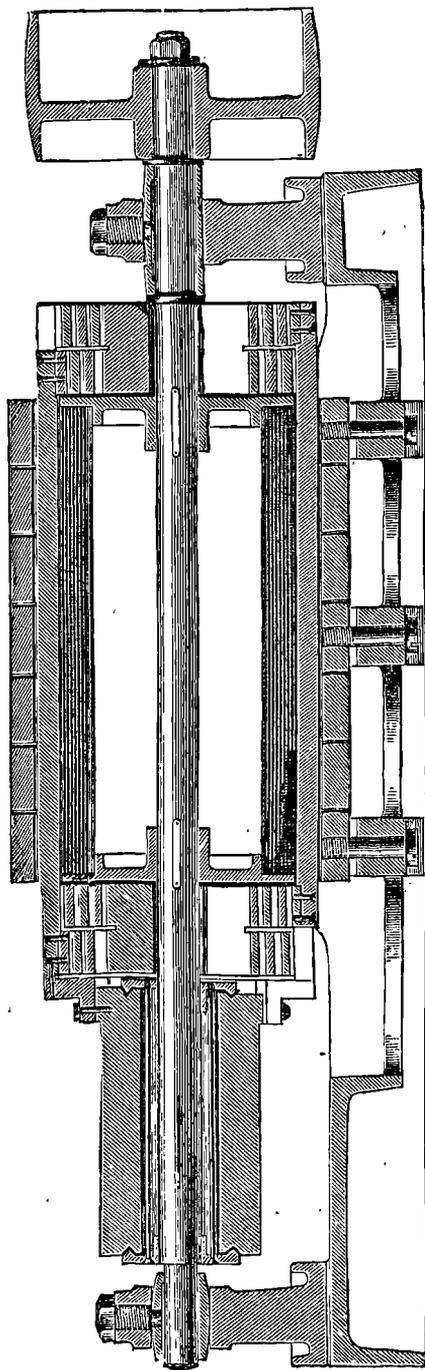


Fig. 244. — Machine Siemens « C » pour électro-metallurgie (Coupe).

beaucoup les grandes machines chimiques (type C) de cette maison dont on a pu remarquer différents spécimens à l'Exposition d'électricité de Paris en 1881.

Nous donnons dans la figure 243 la vue en perspective et dans la figure 244 la vue en coupe de l'une de ces machines destinées au traitement électrolytique du cuivre. Ici, non seulement l'armature, mais encore les bobines d'électro-aimants sont formées d'énormes barres de cuivre de 3 à 4 centimètres carrés de côté. Dans ces conditions, ces machines ont naturellement une faible force électromotrice (la différence de potentiel aux bornes ne dépasse pas, à la vitesse normale, 3, 5 volts); mais elles débitent un courant de 1000 ampères. C'est, croyons-nous, la plus grande intensité de courant obtenue d'une seule



Fig. 245. — Connexions entre la bobine et le collecteur de la machine Siemens « C ».

et même machine en exploitation. Cette intensité est telle qu'elle chauffe considérablement des conducteurs en cuivre de la grosseur d'un bras d'enfant. La bobine a peu de sections, comme on peut le voir par la figure 245 qui indique ses liaisons avec le collecteur. Quant aux balais, ils viennent, par une disposition spéciale, presser sur le collecteur sans l'emploi de ressorts. — La résistance totale de cette machine ne dépasse pas 0,0007 d'ohm.

Dans les machines chimiques à moindre débit, la bobine est faite, ainsi que nous l'avons dit page 145, de plusieurs fils conduits simultanément et reliés parallèlement; ils se prêtent mieux que de très gros fils à l'opération toujours délicate du bobinage. Les bobines inductrices sont également constituées de fil, les électro-aimants étant au besoin réunis tous quatre en arc parallèle; cette construction est beaucoup moins coûteuse et moins difficile que la réunion des énormes barres de cuivre ci-dessus soudées à l'argent et dont la soudure résiste mal aux trépidations des transports, vu surtout le poids considérable des pièces qu'elle relie.

Nous bornerons ici la description sommaire de ces quelques types de machines Siemens, non sans regret de ne pouvoir citer toutes les améliorations et modifications successives étudiées par cette maison, et notamment un dernier type dont la conception absolument nouvelle et différente de ce qui existe jusqu'ici ne nous est encore connu que par un brevet récent.

MACHINES EDISON. — Comme congénère de la machine Siemens dont elle n'est qu'une modification, nous mentionnerons le nouveau type actuel des machines Edison représenté par la figure 246.

Au point de vue mécanique, nous y retrouvons la construction robuste nécessaire au bon fonctionnement des machines toujours appelées à marcher à des vitesses relativement considérables. Au point de vue électro-magnétique, nous y constatons le retour à la section

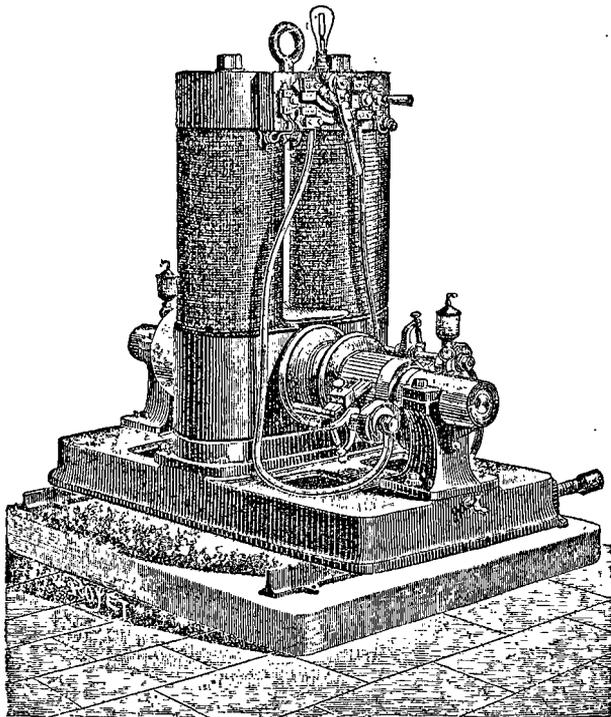


FIG. 246. — Machine Edison (type actuel).

circulaire des noyaux d'électro-aimants dont le modèle Edison-Hopkinson (fig. 105) nous avait déshabitués et qui, vu surtout leur forme plus ramassée, ne concorde pas avec les données théoriques de l'auteur (page 37). Quant aux pièces polaires, leur masse considérable contraste singulièrement avec celle des formes adoptées dans les nouveaux types Siemens que nous avons précédemment décrits.

E. B.

INDEX ALPHABÉTIQUE

A

- Activité**, 17, 104, 110, 123, 190, 214, 343, 378, 401, 407.
- électrique, 215, 216.
 - maxima; Loi d' — ou de Jacobi, 342, 343, 347, 348, 350.
- Aimantation**, 33, 37, 74, 75, 77, 78, 88, 95, 290.
- résultante, 79, 361.
- Aimants**; Action mutuelle des, 331.
- — et des courants, 332, 334, 335.
- Aimants permanents**, 35, 46, 88, 95, 210, 250, 251, 266.
- Alimentation d'un foyer à arc**; Vitesse minima pour l', 309.
- des moteurs, 385, 389.
- Allen. P.**; Expérience d', 139.
- Ampère**; Formule d', 220.
- Règle d', 7.
- Ampères-tours**, 120, 226, 290.
- Angle de calage des balais**, 75, 80, 82, 416, 417, 442.
- de retard dans les machines à courants alternatifs, 279.
- Anneau**, 23, 24, 25, 28, 29, 110, 197.
- allongé, 114, 117, 120, 129.
 - double (Deprez), 40, 113.
 - plat ou Disque, 30, 122, 129, 132.
- Anneau plat**; Avantages de l', 132.
- Gramme, 23, 24, 25, 28, 29, 110, 197.
 - Pacinotti, 23, 28, 29, 108, 197, 200.
- Anneaux Gramme et Pacinotti comparés**, 69, 71, 72.
- Appareil thermique de Carnot**, 349.
- Applications des caractéristiques**, 309, 323, 393.
- Arc parallèle**; Montage en, 24, 73, 92, 170, 172, 195, 197.
- Armature élémentaire à âne de fer**, 195.
- — à spires multiples, 194.
 - Coefficient d', 121, 188, 191.
 - Surface équivalente d', 86, 188, 191, 194, 195, 196, 198, 208.
- Armatures**, 23.
- annulaires (*voir* Anneau).
 - cylindriques (*voir* Bobines).
 - disques, 28, 162, 163, 165, 166.
 - polaires, 28, 30, 173.
 - Aération des, 34, 127, 132, 170.
 - Ames des, 31, 195.
 - Bobines des, 32, 189.
 - Classification des, 28.
 - Construction des, 23.
 - Échauffement des, 31, 32, 33, 34, 49, 84, 152, 170.
 - Équilibre des, 34.
 - Forme des, 32, 33.
 - Inversion du courant dans les, 364.

Armatures, et Champ magnétique; Réactions des, 73, 361, 380, 391.
 — Réactions dans les, 78.
 — Spires des, 32, 194.
 — spéciales (*voir les Machines ou Moteurs de même nom*).
Auto-excitation, 2, 184.
Auto-régulation; Combinaisons pour, 91, 95, 96, 249, 251, 372, 383, 384.
Ayrton et Perry. Armature de moteur, 373.
 — Augmentation de la résistance apparente des armatures, 84.
 — Combinaisons pour auto-régulation, 91, 95, 96, 372, 383, 384.
 — Courbes, 326.
 — Dynamomètre, 105, 382, 400, 403.
 — Electro-aimants pour moteur, 372.
 — Frein, 401.
 — Inverseur de marche, 376.
 — Machines, 16, 29, 163, 164.
 — Mesure de la discontinuité, 209.
 — Moteur, 370.
 — Moyens de gouverner les moteurs, 372, 383, 384.
 — Retard magnétique, 75.
 — Théorie des moteurs auto-régulateurs, 383, 384.

B

Balais, 21, 47, 50, 58.
 — Calage des, 22, 38, 48, 73, 75, 77, 79, 80, 81, 82, 85, 87, 361, 362, 364, 377.
 — Différence de potentiel entre les, 189, 224.
 — Position des, 205.
 — Réglage automatique des, 114.
 — spéciaux (*voir les Machines ou Moteurs de même nom*).
Balance expérimentale de S.-P. Thompson, 222.
 — de courant de Joule, 223.
Bases élémentaires de calculs, 188.
Bobine double T ou en navette de Siemens, 22, 141, 154, 196, 367, 372, 373.
 — Hefner-Alteneck, 141, 420.
 — Siemens, 15, 16, 22, 85, 92, 141, 154, 420.

Bobines ou Armatures cylindriques, 22, 26, 28, 141.
 — actives et inactives, 57.
 — élémentaires, Sections ou Torons d'armatures, 25, 32.
 — parallèles, 24, 73, 170, 172.
 — spéciales (*voir les Machines de même nom*).
 — des armatures, 32;
 — — Largeur angulaire des, 189.
 — des électro-aimants, 41.
 — — Répartition du fil sur les, 34, 42.
Brush. 97, 100.
 — Armature, 28, 134, 139.
 — Balais, 50.
 — Circuit taquin (Teaser), 140.
 — Commutateur, 134.
 — Machine, 15, 28, 47, 58, 78, 93, 134.
 — — Caractéristique de la, 78, 140, 303.
 — — Expérience d'Allen sur la, 139.
 — Régulateur automatique, 102, 140, 382.

C

Cabanellas (G.). Transport de force, 358.
Capacité magnétique, 37, 196.
Caractéristique de la dynamo en dérivation, 312.
 — totale —, 316.
 — de la dynamo en série, 292, 301.
 — d'une dynamo en dérivation avec aimants permanents, 317.
 — Relation entre la — et les dimensions d'une machine, 311.
 — — et l'enroulement, 306.
 — — et la vitesse, 303, 315.
 — Résistance dans la, 304.
Caractéristiques, 77, 91, 285, 291.
 — externes, 298, 312.
 — — des dynamos auto-régulatrices, 321.
 — internes, 312.
 — des dynamos auto-régulatrices, 318.

- Caractéristiques** des machines magnétos et à excitation indépendante, 300.
- de puissance en chevaux-vapeur, 293, 302, 303, 313.
 - Application des, 309, 323.
 - Convexité des — dans les machines compound, 265, 320.
 - Échelle des, 297.
 - Nom des, 292.
 - spéciales (*voir les Machines de même nom*).
- Chaleur** développée dans les fils, 43, 341, 345, 354.
- Champ** magnétique, 3, 8, 10, 66, 67, 81, 331, 406.
- — indépendant, 94, 95, 100, 383.
 - — initial, 94, 95, 100, 383.
 - — Coût du, 35, 89, 213.
 - — Densité du, 80.
 - — Effort du, 406.
 - — Intensité du, 86, 189, 191, 193, 210, 225.
 - — Maintien du, 329.
 - — Mesure du, 211.
 - — Modes d'excitation du, 88.
 - — Renforcement du — dans les machines réceptrices, 362.
 - — Tension du, 80.
 - — et armatures; Réactions entre, 73, 361, 380, 391.
- Changement** de marche des machines, 375.
- Charge** des accumulateurs; Application des caractéristiques à la, 323, 324.
- Cheval** électrique, 295.
- vapeur, 215.
- Circuit** électrique, 4.
- magnétique, IV, 39, 236.
 - ouvert; Dynamos à, 140.
 - teaser, 140.
 - Court, 28, 34, 49, 83, 84, 86.
 - — magnétique, 41.
- Classification** des armatures, 28.
- des machines, 15, 108, 161, 182.
- Coefficient** économique, 189, 214, 215, 216, 218, 229, 241, 273.
- — et rendement des machines dynamos, 214.
 - — Variations du — suivant le courant, 217, 327.
- Coefficient** géométrique, 121, 189, 225, 226, 231, 233, 235.
- Collecteurs** et Commutateurs, 21, 26, 47.
- Aération des, 50, 160, 435.
 - Exploration des, 54, 55.
 - Isolement des, 49.
 - Potentiel aux, 55, 57, 125, 128, 138.
 - Segments ou Lames des, 26, 49, 374.
 - spéciaux (*voir les Machines ou Moteurs de même nom*).
- Combustion** du charbon et du zinc; Travail de, 337.
- Commutation**; Diamètre de, 18, 21, 22, 31, 49, 51, 73, 76, 79, 80, 81.
- Compound** (*voir* Enroulement, Dynamo. Montage).
- Conservation** de l'énergie, 337, 338.
- Constantes** de la dynamo en dérivation; Détermination des, 241.
- — en série, 228.
- Construction** des machines; Principes de la, 13, 17.
- Constructions** graphiques d'Alexandre Siemens, 393.
- Cosinus**; Lois de, 56, 193.
- Couplage** en arc multiple, arc parallèle, dérivation ou quantité, 24, 73, 92, 170, 172.
- en série, 29, 95.
- Couple** mécanique, de Rotation ou de Torsion, 104, 105, 189, 325, 378, 400, 402.
- — Courbes du, 325.
 - — Moment d'un, 104, 325, 378, 400.
 - — et vitesse d'un moteur, 378.
- Courant**, 189.
- constant; Alimentation d'un moteur sous, 389.
 - — Combinaisons pour, 99, 250, 389.
 - — Distribution sous, 92, 93, 105, 249, 250, 265, 322, 354.
 - critique d'une machine, 308.
 - électrique, 8, 10.
 - Alternances du, 281.
 - Distribution du, 90, 180.
 - Équations du — de la dynamo en dérivation, 240.

- Courant** ; Équation du — de la dynamo en série, 228.
 — Intensité du, 189.
 — Ondulations du, 23.
 — Variations du, 280.
 — dans une dynamo; Sens du, 21, 82.
- Courants alternatifs**, 14.
 — — Machines à, 16, 168, 274.
 — induits; Sens des, 7.
 — internes, 76, 86.
 — parasites ou de Foucault, 29,
 31, 33, 41, 43, 76, 126, 139,
 154, 156, 162, 173, 174, 184,
 185, 186, 429.
 — rectifiés ou redressés, 25.
 — Continuité des, 25, 109, 201, 202,
 374.
- Courbe** du courant total dans l'induit d'une dynamo en dérivation, 316.
 — de la dynamo en dérivation, 314.
 — — en série, 314.
 — — compound, 320.
 — de la force employée pour le maintien du champ magnétique, 329.
 — d'une machine magnéto-électrique, 286.
 — de saturation d'un électro-aimant, 287.
 — de variation du coefficient économique, 327.
- Courbes** du couple mécanique, 325.
 — d'induction, 51, 61, 64, 65, 68.
 — du moment magnétique, 234.
 — de potentiel, intégrées, 53, 65, 66, 68.
- Court-circuit**, 28, 34, 49, 83, 84, 86.
 — — magnétique 41.
- Crompton et Kapp**, 91, 100.
- Crompton-Kapp**. Armature, 29, 117.
 — Enroulement compound, 133.
 — Machine, 29, 117, 406.
- Cuivre**; Qualité et Quantité du, 33, 44.

D

- Définition** de la machine dynamo, 1, 4.
- Deprez** (Marcel). Appareil pour l'étude de la loi des similitudes, 222.
 — Combinaisons pour auto-régulation, 91, 94.
 — Courbes, 295, 326.

- Deprez** (Marcel). Électro-aimants, 39, 113.
 — — Études sur les, 133.
 — Expériences de transport de force, 357.
 — Frein, 400.
 — Loi des similitudes, 220.
 — Machine, 40, 113.
 — Mesure de la force absorbée par une machine, 214.
 — Méthode d'équilibre, 406.
 — Moteurs, 367, 381.
 — — Régulation des, 381, 383.
 — Nom des Caractéristiques, 292.
 — Rendement de deux machines, 357.
- Dérivation**; Longue, 98, 262, 272, 387, 390.
 — Couplage ou montage en, 24, 73, 92, 170, 172, 195, 197.
- Désamorcement**, 306, 315.
- Déterminantes**, 359.
- Détermination** des constantes de la dynamo en dérivation, 241.
 — — en série, 228.
 — des électro-aimants des machines génératrices, 230, 245, 254, 257, 261, 264, 267, 268, 270, 273.
 — — des moteurs, 386, 388, 390.
 — de l'intensité du champ magnétique d'une machine magnéto, 211.
 — de l'ondulation du courant d'une machine, 208.
 — de la surface équivalente d'armature, 196.
- Diagrammes indicateurs** des machines à vapeur, 285, 400.
 — de puissance et de rendement des moteurs (par Gisbert Kapp), 396.
- Diamètre** de commutation, 18, 21, 22, 31, 49, 51, 73, 76, 79, 80, 81.
- Différence** de potentiel et force électromotrice, 88, 423.
 — — de balai à balai, 189, 224.
 — — de borne à borne, 189, 212, 224, 237.
 — — constante, 92, 93, 106, 125.
 — — — Combinaisons pour, 94, 249, 250, 251, 253, 255.
- Dimensions** et rendement des machines, 218.
 — et caractéristiques —, 311.

- Discontinuité**; Mesureur de, 209.
- Disques**; Machines, 16, 163, 165, 182, 333.
- Distribution en dérivation**, 92, 180.
- en série, 92, 181.
 - sous différence de potentiel constante, 92, 93, 106, 248, 249, 251, 318, 353.
 - à intensité constante, 92, 93, 105, 249, 250, 265, 322, 354.
- Double anneau**; Machine à, 40, 113.
- enroulement, 99, 101.
- Dynamo auto-éxcitatrice**, 2, 18, 170, 181.
- auto-régulatrice, 91, 104, 129, 156, 248, 251.
 - — Caractéristiques de la, 318, 321.
 - compound, 19, 251, 258.
 - — Coefficient économique de la, 273.
 - — Courbes de la, 320.
 - — Effet de la réaction de l'induit dans la, 263.
 - — — pratique du terme de saturation dans la, 264.
 - — réceptrice; Sens de rotation, 364.
 - considérée comme moteur ou réceptrice, 109, 330.
 - élémentaire idéale, 20, 190.
 - unipolaire, 16, 184, 186.
 - à aimants permanents, 4, 88, 93, 210.
 - à différence de potentiel constante, 93, 94, 248, 249.
 - à excitation indépendante, 3, 18, 88, 93, 94, 100, 213, 300.
 - à intensité constante, 93, 99, 249, 250.
 - en dérivation, 2, 18, 89, 92, 93, 106.
 - — combinée et compound, 99, 265, 271, 317, 322.
 - — réceptrice; Sens de rotation de la, 364.
 - — Caractéristique de la, 312.
 - — — totale de la, 316.
 - — Coefficient économique de la, 241.
 - — Courbe de la, 314.
 - — — du courant total dans l'induit de la, 316.
 - — Détermination des constantes de la, 241.
 - — Emploi de la, 90, 92, 96.
- Dynamo en dérivation**; Équations de la — déduites de la loi de saturation, 239.
- — Équations du courant de la, 240.
 - — Règle pratique pour le calcul d'une — économique, 244.
 - — Théorie algébrique de la, 237.
 - — — géométrique de la, 312.
 - en série ou ordinaire, 2, 18, 89, 92, 93.
 - — combinée et compound, 94, 249, 251, 258, 318.
 - — réceptrice; Sens de rotation de la, 364.
 - — Caractéristique de la, 292, 301.
 - — Coefficient économique de la, 229.
 - — Courbe de la, 314.
 - — Détermination des constantes de la, 228.
 - — Emploi de la, 89, 92.
 - — Équations de la — déduites de la loi de saturation, 225.
 - — Équation du courant de la, 228.
 - — Théorie algébrique de la, 224.
 - — — géométrique de la, 301.
- Dynamomètre d'absorption**, 401, 462.
- de transmission, 105, 214, 402.
 - Ayrton et Perry, 105, 400, 403.
 - Hefner-Alteneck (von), 105, 382, 400, 403.
 - Morin, 105, 382, 400, 403.
 - Smith, 105, 400, 403.
- Dynamomètre** (voir aussi Machines).
- à circuit ouvert, 140.
 - à courants alternatifs, 16, 168, 180.
 - — et à courant continu; Comparaison, 180.
 - — Accouplement des, 233.
 - — Théorie algébrique des, 274.
 - de la Classe I, 15, 108.
 - — II, 16, 161.
 - — III, 16, 182.
 - non classées, 186.

- E**
- Edison**, 103.
 — Armature, 28, 85, 149, 197.
 — — Construction de l', 150.
 — Balais, 50.
 — Dynamomètre, 403.
 — Electro-aimants, 39, 46, 149.
 — Machine, 15, 28, 85, 93, 147, 458.
 — — Disque, 16, 165.
 — — Pendule ou à balancier, 16, 187.
- Edison-Hopkinson**, Machine, 66, 152, 265.
 — — — Courbe de la, 329.
- Effet économique**, 343.
 — pratique du terme de saturation dans les machines compound, 264.
 — utile, 336.
 — de la réaction de l'induit dans les machines compound, 263.
- Effort statique**, 189, 220, 325.
 — — Prix de l', 327.
- Électro-aimant transversal** de Pacinotti, 109.
- Électro-aimants intérieurs**, 38, 160.
 — — sectionnés, 114.
 — — Aération des, 147.
 — — Bobines des, 41.
 — — Constitution et construction des, 35, 38, 45, 87.
 — — Courbe de saturation des, 286.
 — — Échauffement des, 43.
 — — Étude sur les, 133.
 — — Formules des, 410.
 — — Inversion du courant dans les, 364.
 — — Largeur angulaire des, 172, 177.
 — — Noyaux des, 37, 45.
 — — — Fer et fonte des —; Comparaison, 120.
 — — Règles pour l'enroulement des, 134.
 — — Résistance propre des, 42.
- Électro-dynamomètre**; Observation sur l'emploi de l', 283.
- Électromètre**; Emploi de l', 283.
- Énergie calorifique**, 341.
- Energie dépensée**, 348, 349, 352, 353, 355, 357.
 — électrique, 341.
 — — par seconde, 104, 215, 281, 297, 326.
 — utilisée, 353.
- Enroulement compound**, 99, 101.
 — — pour moteurs, 365, 372, 373.
 — — Disposition de l', 102, 125, 129, 133, 134, 147.
 — — Priorité d'invention de l', 100.
 — — Théorie de l', 218, 384.
 — différentiel pour moteurs, 365, 372, 384, 385.
 — de la bobine Siemens, 32.
 — — ancien, 15, 16, 22, 92, 142, 421.
 — — nouveau, 15, 16, 142.
 — des électro-aimants, 134.
 — — des machines génératrices, 230, 245, 254, 257, 261, 264, 267, 268, 270, 273.
 — — des moteurs, 386, 388, 390.
 — des machines, 42, 44, 229, 243.
 — — et caractéristiques, 306.
- Enroulements compound spéciaux**, 91, 102, 124, 125, 133, 147, 262.
- Épreuves des machines et moteurs**, 214, 398.
 — — Résultats d', 129, 154, 229, 235, 241, 245, 357, 367, 370, 372, 373, 379, 449.
- Équilibre**; Méthode d', 400, 406.
- Équivalent mécanique** de la chaleur, 345.
- Erg-mètre**, 400.
- Étincelles aux collecteurs**; Causes des, 38, 62, 73, 83, 85.
 — — Prévention des, 49, 50, 77, 87.
- Excitation séparée**, 3, 18, 88, 94, 100, 213, 250, 253, 267.
 — — Machine à, 213.
 — en dérivation etc. (voir *Dynamo en dérivation*, etc.).
 — en série, etc., (voir *Dynamo en série*, etc.)
 — du champ magnétique, 88.

- Excitation.** Méthodes de combinaisons d', 91.
- Excitatrice;** Machine, 170.
- F**
- Fantômes magnétiques,** 9, 10, 67, 81, 331, 334, 335.
- Faraday,** inventeur de la machine dynamo, 183, 184.
- Aimant tournant de, 184.
 - Machine disque de, 16, 182.
 - Principe de, 7, 10.
- Fer;** Perméabilité magnétique du, 40, 195, 198.
- Qualité et quantité, 36, 45, 77, 87, 196, 225, 231.
 - Saturation du, 32, 77, 92.
- Fer et fonte** comme noyaux d'électro-aimants; Comparaison, 120.
- Fonte;** Perméabilité magnétique de la, 45, 196.
- Force,** activité, puissance, travail par seconde, 17, 104, 119, 125, 190, 214, 343, 378, 401, 407.
- absorbée par une machine; Mesure de la, 214, 399, 400, 402, 405.
 - angulaire, 189, 225.
 - axiale, 325.
 - contre-électromotrice, 338, 341.
 - dépensée pour le maintien d'un champ magnétique; Courbe de la, 329.
 - électromotrice, 7, 78.
 - — et différence de potentiel, 88, 423.
 - — additionnelle, 93.
 - — élevée; Emploi de, 355.
 - — extérieure, 189.
 - — induite; Expression de la, 277, 279, 413.
 - — initiale, 95.
 - — moyenne, 190, 193, 278.
 - — totale, 189, 212, 224, 238, 293, 297.
 - — Ondulations de la, 198, 199, 203, 207.
- Formules** pour les dynamos (Gisbert Kapp), 120.
- — (Sir W. Thomson), 42.
- Formules** relatives aux électro-aimants, 410.
- Frein** dynamométrique; Réglage au, 400.
- Freins** divers, 400, 401, 402.
- Carpentier, 401.
 - Prony, 400, 401, 402.
 - Raffard, 400, 402.
- Frettes,** 118.
- Friction** magnétique, 76, 406.
- Frölich** (Dr O.), 91, 226.
- Courbes du, 292, 295, 326.
 - Formules du, 225, 233, 412.
 - Principe de la bobine Siemens, 420.
- G**
- Gauss;** Loi de, 334.
- Unité d'intensité de champ magnétique, 189, 194.
- Générateurs** ou Machines génératrices, 4 109.
- Gramme;** Anneau, 23, 24, 25, 28, 29, 110, 197.
- Balais, 50.
 - Commutateur, 110.
 - Electro-aimants, 39.
 - Machine, 15, 28, 29, 110, 443.
 - — à aimants Jamin, 46, 111.
 - — à courants alternatifs, 174, 452.
 - — à grand débit, 445.
 - — multipolaire, 132, 445.
 - — octogonale, 16, 444, 451.
 - — pour transport de force, 450.
 - — Caractéristique de la, 302.
 - — Étude de la — par Niaudet, 5, 112.
 - — Potentiel au collecteur d'une, 55.
 - Moteur, 366, 448, 450.
 - Pièces polaires, 132.
- Gülcher.** Enroulement compound, 125, 133.
- Machine, 16, 28, 29, 30, 124, 126.
 - — compound; Caractéristique extérieure de la, 321.
 - Pièces polaires, 124, 126, 132.

H

- Hefner-Alteneck** (von); Bobine, 28, 85, 141, 142, 420.
 — Commutateur, 163.
 — Dynamomètre, 105, 382, 400, 403.
 — Machine disque, 16.
 — Machines, 15, 16, 28, 163.
Hopkinson (Dr John); Accouplement des machines à courants alternatifs, 283.
 — Application de la caractéristique à la charge des accumulateurs, 323.
 — Courbes, 91, 291, 292, 295.
 — Inverseur de marche des machines, 376.
 — Modifications de la machine Edison, 46, 152.
 — Problème sur les moteurs électriques, 395.
 — Réactions dans les armatures, 78.
 — Treuil électrique, 368.
 — et A. Muirhead; Machine, 16, 47, 163.

I

- Inducteur**; Système (*voir* Electro-aimants), 35, 45.
Induction des courants dans les armatures, 51.
 — magnétique; Coefficient d', 225.
 — mutuelle, 78, 82, 86, 408.
 — — Coefficient d', 419.
 — — Mesure de l', 408.
 — propre (*voir* Self-induction).
 — Courbes d', 51, 61, 64, 65, 68.
 — Équation de M. Joubert, 413.
 — Fausse, 60, 62.
 — Inversion d', 64, 65.
 — Production de l', 7, 51.
 — Self — ou Auto —, 8, 78, 82, 275, 294, 300, 364, 391.
 — — Coefficient de, 84, 90, 190, 275, 276.
Induit; Système (*voir* Armatures), 22.

- Inertie** électrique, 83, 275.
 — magnétique, 37, 75, 86.
 — mécanique, 374.
Instabilité de la lumière à arc; Explication de l', 310.
Intégration, 53.
Intensité constante, 105.
 — — Alimentation des moteurs sous, 389.
 — — Distribution à, 92, 93, 105, 249, 250, 265, 322.
 — — Machines à, 93, 99, 249, 250.
 — du Champ magnétique, 86, 189, 191, 193, 210, 225.
 — — Détermination de l' — dans une machine magnéto, 211.
 — — Mesure de l', 211.
 — — Réglage de l', 88.
 — de Courant, 189.
Introduction, 1.
Inverseurs de marche, 376.
Inversion du courant dans les armatures, 364.
 — — dans les électro-aimants, 364.
Isenbeck (Dr); Appareil du, 59.
 — Recherches du, 54, 56, 57, 59.
Isolement des spires des bobines, 34.
 — Épreuves d', 399.

J

- Jacobi**, 343, 411.
 — Commutateur de, 170, 333.
 — Loi d'activité maxima ou de, 342, 343, 347, 348, 350.
 — Moteur, 170, 333, 366.
Joubert (J.); Équation d'induction de, 413, 415.
 — Étude des machines à différentes vitesses, 287.
 — — de la Self-induction, 34, 281, 284, 408.
Joule; Balance de, 223.
 — Electro-aimants de, 373.
 — Équivalent mécanique de la chaleur, 345.
 — Loi de, 229, 241, 345, 354.

K

- Kapp** (Gisbert); Diagramme de puissance et rendement des moteurs, 396.
 — Enroulement Compound, 100.
 — Formules pour les machines dynamos, 120.
 — (*voir aussi* Crompton-Kapp).

L

- Largeur** angulaire des bobines d'armatures, 189.
 — — inducteurs, 172, 177.
 — — pièces polaires, 129, 132.
Lenz; Loi de, 363.
Ligne neutre, 419, 420.
Lignes de force magnétiques, 8, 48, 63, 66, 74, 79, 331.
 — — coupées; Augmentation des, 12.
 — — — Diminution des, 12, 193.
 — — Interception des, 190, 193, 276.
 — — Interspersion des, 136.
 — — Nombre des, 136.
Loi des similitudes, 220.

M

- Machine** (*voir aussi* Dynamo).
 — à double anneau, 40, 113.
Machine dynamo; Son nom, 1.
 — électro-magnétique, 330.
 — excitatrice, 170.
 — génératrice ou primaire, 4, 109.
 — magnéto-électrique, 4, 88, 95, 210.
 — — Caractéristique de la, 300.
 — — Courbe de la, 286.
 — Pot, 141, 370.
 — réceptrice ou secondaire, ou moteur, 109, 330.
 — thermique, 186, 187, 349, 352.
 — — Comparaison avec la machine électrique, 353.

- Machine** unipolaire, 16, 184.
 — Rendement d'une — Mesure du, 399.
Machines dynamo-électriques; Organes des, 20.
 — — Principes de construction des, 13, 17.
 — multipolaires, 130.
 — pour électro-chimie, 97, 115.
 — pour électro-métallurgie, 32, 184, 445, 456, 458.
 — Résistance des —; Mesure de la, 398, 399.
 — Sens de rotation des, 364, 375, 377.
 — Types de, 108, 161, 182.
 — Allan, 28, 30.
 — Alliance (*de l'*), 168.
 — Alteneck (von Hefner-), 15, 16, 28, 85, 163.
 — Arago (*Disque d'*), 163.
 — Ayrton et Perry, 16, 163.
 — Ball (*Disque d'Arago*), 163.
 — Barlow (*Roue de*), 182.
 — Bright (Sir Ch.), 187.
 — Brockie, 162.
 — Brush, 15, 28, 47, 50, 58, 78, 93, 134, 140, 303.
 — Bürgin, 15, 28, 45, 85, 116.
 — — — Crompton, 116.
 — Cabella, 115.
 — Clarke, 116.
 — Crompton-Kapp, 29, 117, 406.
 — Delafeld, 186.
 — Deprez (Marcel), 40, 113.
 — Edelmann, 140.
 — Edison, 15, 28, 50, 85, 93, 147, 458.
 — — (*Disque*), 16, 165.
 — — (*Pendule*), 16, 187.
 — — Hopkinson, 46, 152, 265, 329.
 — Elmore, 28, 30.
 — Emerson et Murgatroyd, 112.
 — Elphinstone-Vincent, 16, 28, 38, 40, 46, 157, 165.
 — Faraday (*Disque de*), 16, 182, 333.
 — Fein, 15, 28, 30, 140.
 — Ferranti-Thomson, 16, 169, 176, 181.
 — Ferraris, 186.
 — Fitzgerald, 140.

- Machines** Forbes, 187.
 — Fuller-Gramme, 112.
 — Ganz (*voir* Mechwart-Zipernowsky), 30, 175, 181.
 — Gordon, 16, 169, 171, 181.
 — Gramme, à aimants Jamin, 46, 111.
 — — à courants alternatifs, 174, 452.
 — — à courant continu, 15, 28, 29, 50, 110, 443.
 — — à grand débit, 454.
 — — multipolaire, 132, 445.
 — — octogonale, 16, 450.
 — Gulcher, 16, 28, 29, 30, 124, 126.
 — Hefner-Alteneek (von), 15, 16, 28, 163.
 — Heinrich, 28, 30, 122.
 — Hipp, 28, 85.
 — Hjörth (Soren), 97.
 — Hockhausen, 49, 114.
 — Holmes, 16, 168.
 — Hopkinson et Muirhead, 16, 47, 163.
 — Houston-Thomson, 32, 140, 158.
 — Jablochhoff, 29, 181.
 — Jürgensen, 15, 28, 30, 38, 46, 140.
 — Kapp (*voir* Crompton-Kapp), 29, 117.
 — Lachaussée, 169, 171.
 — Lane-Fox, 162.
 — Leipner, 162.
 — Lever, 187.
 — Lontin, 15, 28, 29, 30, 173, 181, 283.
 — Lorenz et Jürgensen, 140.
 — Lumley, 122, 141.
 — Maxim, 114.
 — Mechwart-Zipernowsky, 30, 175, 181.
 — Meritens (de), 16, 28, 174.
 — *Mouse-mill* de Sir William Thomson, 15, 38, 46, 160.
 — Newton, 140, 157.
 — Niaudet, 16, 32, 47, 85, 161.
 — Nollet, 168.
 — Pacinotti, 23, 28, 29, 47, 69, 108.
 — Paterson et Cooper, 121.
 — Perry (John), 29, 164.
 — *Phénix* (*voir* Paterson et Cooper), 121.
- Machines** Pixii, 16, 161.
 — *Poulie* de Sir W. Thomson, 16, 166.
 — Schverd et Scharnweber, 140.
 — Schuckert, 15, 28, 30, 47, 122.
 — — -Mordey, 16, 30, 125.
 — Siemens, à barres, 455.
 — — à courants alternatifs, 16, 169, 170, 181.
 — — à courant continu, 15, 22, 26, 28, 32, 39, 50, 83, 91, 97, 102, 141, 292, 296, 299, 373, 453.
 — — à disque, 16.
 — — à grand débit ou chimique, 456.
 — — Pot, 141, 370.
 — — unipolaire, 16, 184.
 — Smith (Willoughby), 186.
 — Stührer, 168.
 — Sturgeon (*Roue de*), 182, 333.
 — Thompson (S.-P.), 186, 187.
 — Thomson (Sir W.), *Mouse-Mill*, 15, 38, 46, 50, 160.
 — — *Poulie*, 16, 166.
 — — Ferranti, 16, 176.
 — — (Elihu), (*voir* Houston-Thomson), 32, 140, 158.
 — Thury, 158.
 — Varley, 50, 184, 186.
 — *Victoria* (*voir* Schuckert-Mordey), 16, 30, 125, 126.
 — Voice, 16, 186.
 — Wallace-Farmer, 16, 32, 85, 161.
 — Weston, 28, 29, 47, 85, 92, 154.
 — Wilde, 3, 16, 39, 46, 168, 333.
 — Willoughby Smith (*voir* Smith), 186.
 — Zipernowsky, 30, 158.
- Magnétisme** (*voir* Aimantation).
 — rémanent, 291, 294, 317, 440.
 — terrestre, 211, 440.
- Magnéto** dynamo ou machine magnéto-électrique, 4, 88, 95, 210.
- Magnétomètre**; Emploi du, 288.
- Mascart**, V, VI, 284, 413.
 — Étude sur les machines électro-magnétiques et électro-dynamiques, 426.
- Maxwell**, 284, 334, 408, 409, 413.
- Mesure** de la puissance mécanique :
 — — Méthode dynamométrique, 400, 402.

- Mesure de la puissance mécanique :**
 — — Méthode d'équilibre, 400, 405.
 — — — du frein, 400.
 — — — graphique, 399, 400.
- Module d'une machine, 120.**
- Moment magnétique, 77, 85, 226, 291.**
 — — Courbes du, 234.
 — statique, 189.
 — d'un couple, de rotation ou de torsion, 104, 105, 189, 325, 378, 400.
- Montage compound, 99, 101, 102, 124, 125, 129, 133, 134, 147.**
 — en dérivation, 2, 24, 73, 92, 170, 172.
 — en série ou tension, 29, 92, 95.
 — en séries multiples parallèles, 92.
- Moorsom (W.-M.), 413, 415.**
- Mordey (W.-M.), Amélioration de la machine Schuckert, 58, 126.**
 — Distribution du potentiel, 55.
 — Mouvement du point neutre, 417.
- Moteur ou Machine réceptrice, 4, 109, 330.**
 — parfait, 341, 349.
 — Ayrton et Perry, 370.
 — Bourbouze, 335.
 — Cuttriss, 368.
 — Dal Negro, 334.
 — Davidson, 337.
 — Deprez, 367, 381.
 — Froment, 336, 366. †
 — Gramme, 366, 448, 450.
 — Griscom, 367.
 — Henry, 334.
 — Hjørth (Soren), 337.
 — Howe, 368.
 — Jacobi, 170, 333, 366.
 — Méritens (de), 370.
 — Page, 334, 337, 366.
 — Reckenzaun, 372.
 — Ritchie, 332.
 — Siemens, 366, 373, 379.
 — Sturgeon, 333.
 — Thompson (S.-P.); Compound, 373.
 — Trouvé, 337, 367.
 — Wheatstone, 336.
 — Wiesendanger, 337.
- Moteurs auto-régulateurs, 372, 384.**
 — Alimentation des — sous différence de potentiel constante, 385.
 — — sous intensité constante, 389.
 — Enroulement compound ou différentiel des, 365, 372, 373.
- Moteurs; Moyens de gouverner les, 372, 383, 384.**
 — Puissance des, 379.
 — Rendement des, 339.
 — Renversement de marche des, 375.
 — Théorie des, 341, 384.
 — Types spéciaux de, 366, 448.
- Mouvement dans un cercle; Scns du, 12.**
- Moyens de gouverner les machines dynamos ou génératrices, 88.**
 — — les moteurs ou machines réceptrices, 372, 381.
- Müller; Formule de, 410.**
- Multiplication des sections d'armatures ou de collecteurs, 374.**
- N**
- Newton; Expérience sur le prétendu retard magnétique, 416.**
 — Machine, 140, 157.
- Niaudet (Alfred), 5, 66.**
 — Armature de, 32, 85, 161.
 — Commutateur de, 161.
 — Étude de la machine Gramme, 5, 112.
 — Machine, 16, 32, 47, 85, 161.
- Nom de la machine dynamo-électrique, 1.**
- Notations algébriques, 188.**
- O**
- Ohm (Dr); Loi d', IV, 7, 342, 347.**
 — légal, 130, 154.
- Onde harmonique, 66, 67.**
- Ondulations du courant, 25.**
 — — Détermination pratique des, 208.
 — — Mesure des, 208.
 — de la F. é.-m. dans une armature à bobine unique 198.
 — — sectionnée, 199.
 — — Calcul des, 203.
 — — Valeurs des, 207.
- Organes des machines dynamos, 20.**
- Out-put, 119, 214.**

P

- Pacinotti.** Anneau ou Armature, 23, 28, 29, 108, 197, 200.
 — Commutateur, 108.
 — Électro-aimant transversal, 109.
 — Machine, 23, 28, 29, 47, 69, 108.
- Parallèle; Arc —; Couplage ou Montage en** 24, 73, 92, 170, 172, 195, 197.
- Perméabilité magnétique du fer,** 40, 195, 198.
 — — de la fonte, 45, 196.
 — — Coefficient de, 121, 189, 195, 225, 226, 233, 236.
- Pièces polaires,** 41, 46, 58, 129.
 — — Division des, 41, 47.
 — — Échauffement des, 73, 156.
 — — Largeur angulaires, 129, 132.
 — — spéciales (*voir les Machines et Moteurs de même nom*).
- Point critique de saturation,** 234.
 — mort dans les moteurs, 367, 373.
 — neutre, 29, 419.
 — — Mouvement du, 417.
- Pôles,** 8.
 — conséquents, 39.
 — résultants, 79.
- Pollard (J.); Expérience de,** 105.
- Potentiel ou Pression (*voir aussi* Différence de potentiel),** 19.
 — aux bornes d'une machine magnéto, 212.
 — constant (*voir aussi* Différence de potentiel constante), 92, 93, 106, 125.
 — — Alimentation sous, 385.
 — — Distribution sous, 92, 93, 106, 248, 249, 251, 318.
 — Distribution du — au collecteur, 51, 53, 55, 57, 62, 65, 66, 68, 128, 138.
- Poundal,** 189.
- Pouvoir magnétisant,** 43.
- Problèmes relatifs aux moteurs,** 393.
 — — au transport de l'énergie, 354, 359.
- Puissance,** activité, force, travail par seconde, 17, 104, 419, 125, 190, 214

- Puissance; Caractéristiques de,** 295, 302, 303, 313.
 — électrique absorbée et développée, 399.
 — mécanique, 399.
 — d'une dynamo; Mesure de la, 399.
 — — Relation entre la vitesse et la, 17.
 — d'un moteur en dérivation, 379.
 — — en série, 379.

Q

- Quantité; Couplage ou Montage en (*voir* Dérivation).**

R

- Radian,** 189, 192.
 — par seconde, 401.
- Réglage automatique des balais,** 114.
 — de l'intensité du champ magnétique, 88.
- Régulateurs automatiques,** 102, 103, 104, 114.
 — divers, 102, 103, 114, 140, 381, 382, 383.
 — dynamométriques, 105, 382.
 — électriques, 104, 383.
 — périodiques (Ayrton et Perry), 382.
 — à force centrifuge, 103, 104, 381.
- Régulation,** 181.
 — automatique, 102.
 — des moteurs, 381.
 — — Théorie de la — par Ayrton et Perry, 383, 384.
- Rendement,** 214.
 — brut ou de transformation électrique, 215, 217.
 — électrique (*voir* Coefficient économique), 215.
 — maximum, 343.
 — — comparatif (machines électriques et thermiques), 352.

- Rendement** net ou commercial utile, 213, 215, 217.
 — propre d'une machine, 339, 351.
 — et coefficient économique, 214.
 — et dimensions d'une machine, 218.
 — des moteurs, 339.
 — d'un transport de force, 355, 357, 358.
 — Loi du, 342.
 — Mesure du, 399.
- Rendements** spéciaux de machines, 122, 130, 154, 373, 449.
- Renversement** de marche des moteurs, 375.
 — de polarité, 89, 97.
- Répartition** du fil sur les bobines d'électros, 34, 42.
- Représentation** graphique des lois de Jacobi et de Siemens, 348.
- Résistance**, 8, 32, 42, 83, 92.
 — apparente; Accroissement de la, 84, 280.
 — intérieure, 94.
 — magnétique, 40.
 — propre des électro-aimants, 42.
 — dans la caractéristique, 304.
 — d'isolement; Mesure de la, 399.
 — des machines; Mesure de la, 398.
 — Accroissement de la — avec la température, 232.
 — Unité B. A. et Ohm légal, 130, 154.
- Restitution** utile, 357.
- Retard** magnétique; Prétendu, 75, 76, 86, 415, 442.
 — des variations du courant dans les machines à courants alternatifs, 280.
- Réversibilité**, 109, 349.
- S**
- Saturation** magnétique, 32, 77, 92, 198.
 — Coefficient de, 124, 189, 226, 233.
- Saturation**; Coefficient de; Effet pratique du — dans les machines compound, 264.
 — — — Importance du, 231.
 — Courbe de — d'un électro-aimant, 287.
- Schuckert**, 91, 100.
 — Enroulement compound, 124, 133.
 — Machine, 15, 28, 30, 47, 122.
 — — compound; Caractéristique externe, 321.
 — Pièces polaires, 132.
- Schuckert-Mordey**; Machine, 16, 30, 125.
 — Rendement de la, 130.
 — Pièces polaires, 126, 129, 132.
- Sections** d'armatures, 25, 32, 374.
- Self-induction**, 8, 78, 82, 275, 294, 300, 364, 391.
 — Coefficient de, 84, 90, 190, 275, 276, 408.
 — Étude de M. Joubert sur la, 84, 281, 284, 408.
- Sens** de calage des balais, 364, 377.
 — du courant dans une dynamo, 21, 82.
 — des courants induits, 7.
 — du mouvement dans un cercle, 7.
 — de rotation des machines, 364, 375, 377.
- Série**; Couplage ou Connexion en, 29, 92, 95.
 — multiple parallèle, 92.
- Siemens**, 15, 16, 28, 32, 85, 91.
 — Armature, 22, 26, 28, 32, 85, 141, 197, 200, 420, 455.
 — Ascenseur électrique, 370.
 — Balais, 50, 455.
 — Bobine, 22, 141, 154, 196, 367, 372, 373.
 — — Principe de la, 420.
 — Caractéristique de la machine — en série, 292, 296, 299, 321.
 — — en dérivation, 313.
 — Commutateur, 455, 458.
 — Construction de la bobine, 143.
 — Dynamomètre, 403.
 — Électro-aimants, 39, 46.
 — Enroulement de la bobine, 32.
 — — ancien, 15, 16, 22, 92, 142, 420.
 — — nouveau, 15, 16, 142.

Siemens. Machine à courant continu, 97,
102, 144.
— chimique « C », 456, 458.
— compound; Caractéristique,
321.
— — — Enroulement, 91
102, 133, 147.
— — — Étude par Rich-
ter, 147, 322.
— — disque, 16.
— — excitatrice, 170.
— — nouveau type « F », 453.
— — *Pot*, 141, 370.
— — unipolaire, 16, 184.
— — à barres « B », 455.
— — à Courants alternatifs, 16,
169, 170, 181.
— Moteurs ou Machines récep-
trices, 366, 373, 379.
— Treuil électrique, 368.
— Alteneck; Machine disque, 16.
— (Alexandre); Constructions gra-
phiques, 393.
— — Couple de torsion des
moteurs, 379.
— — Enroulement com-
pound, 100.
— (Werner); Armature en double
T ou en navette, 22,
141, 154, 196, 197, 199.
— — Loi du rendement des
moteurs, 344, 346,
348, 351.
— — Nom donné à la dynamo,
1.
— (William, Sir); Caractéristique
de la machine en dé-
rivation, 312.
— — Instabilité de la lumière
à arc, 310.
— — Transport de l'énergie à
force électromotrice
élevée, 355.
Sinus; Lois de, 51, 56, 76, 82, 193, 197,
198.
Sinusoïde, 24, 56, 199.
Smith (Frédéric,-J.); Dynamomètre, 105,
400, 403.
— Épreuves de moteurs, 214, 403, 405.
Sohncke; Formule de, 443.
Spire en mouvement dans un champ ma-
gnétique, 11.
Symboles employés, 188.

Système inducteur, 35, 45.
— induit, 22.

T

Tangentes; Lois de, 76.
Taux d'interception des lignes de force,
190, 193.
Teaser-circuit, 140.
Théorie de la machine génératrice, 5.
— — — réceptrice ou des
moteurs, 341.
— des moteurs auto-régulateurs, 384.
— algébrique de la dynamo, 188, 200,
214, 224, 237, 248, 274.
— — — en dérivation, 237.
— — — en série, 224.
— — — à courants alternatifs
2, 74.
— géométrique —, 285.
— physique —, 7.
Thompson (S.-P.); Appareil pour l'étude
des armatures, 69.
— — du rendement d'une machine,
221.
— Application des caractéristiques à
la charge des accumulateurs, 324.
— Balance expérimentale, 222.
— Inversion de marche des machines,
377.
— Machines, 186, 187.
— Moteur auto-régulateur, 373.
— Régulateur, 382, 383.
Thomson (Sir William); Balais mobiles,
50, 160.
— Électro-aimants, 177.
— Machine à courants alternatifs,
166.
— — Mouse-Mill, 15, 38, 46,
160.
— — Poulie, 16, 166.
— Règles pour l'enroulement des
Machines, 42, 44, 229, 243.
— Ferranti; Machine, 16, 176.
Torque, 189, 325.
Tourbillons magnétiques, 10, 274.
Tours morts, 304.
Transport électrique de l'énergie, 353,
355, 358.
— de force Miesbach-Munich,
352, 357.

Travail, 343.
 — par seconde, 17, 104, 119, 125,
 190, 214.
 — électrique par seconde, 104, 215,
 281, 297, 326.
 — mécanique par seconde, 104, 105,
 216, 325.
 — de combustion du charbon et du
 zinc, 337.
Treuil électrique Hopkinson, 368.
 — — Siemens, 368.
Types de machines, 108, 161, 182.
 — de moteurs, 366.

U

Unité de force électromotrice, 193.
 — d'intensité de champ magnétique,
 189, 194.
 — de résistance, 130, 154.

V

Vélocimètre; Emploi du, 407.
Vitesse, 104, 192.

Vitesse angulaire, 101, 105, 189, 192, 378,
 401.
 — constante, 86, 92, 102.
 — critique d'une machine, 95, 98,
 100, 251.
 — — d'un moteur, 383.
 — et couple mécanique d'un moteur,
 378.
 — et puissance d'une machine, 17.
 — minima pour l'alimentation d'un
 foyer à arc, 309.
 — Études sur la — des machines,
 287.
Volt, 189, 193, 194, 379.
Volt-ampère, 119, 215, 295, 379.

W

Waltenhofen (von); Formule de, 410.
Watt, 119, 215, 295, 379.
Weber; Formule de, 411.

Z

Zug-Kraft, 325.

ERRATA

Pages.	Lignes.	Au lieu de :	Lire :
xv,	7,	Différence du potentiel	Différence de potentiel
16,	24,	obtenir	fournir
112,	3 du bas,	des smachine	des machines
124,	13,	<i>Machines Gülcher</i>	<i>Machine Gülcher</i>
225,	26,	simple	simplifiée
239,	dernière,	$r_a \left(\frac{1}{r} + \right.$	$r_a \left(\frac{1}{r_a} + \right.$
249,	2,	voire même	voire
263,	14,	$(Z + Y) i$	$(Z + Y) i_a$
263,	18,	équation [IX]	équation [X]
267,	2 du bas,	$Gk-Z'i_a$	$Gz-Z'i_a$
326,	17,	plus	moins
353,	Légendes des figures 212 et 213	Chaleur dépensée Énergie dépensée	Chaleur perdue Énergie perdue
353,	13,	$\bar{\mathcal{E}}$	$\frac{E}{\mathcal{E}}$
373,	3,	cheval. Ce qui	cheval, ce qui
375,	dernière,	ces deux opérations peu- vent s'effectuer	on peut effectuer ces deux opérations
421	1,	le calcul	la pratique

